



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA**

ANTONIO RAFAEL DE VASCONCELOS GALVÃO SOBRINHO

**METODOLOGIA PARA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE
DISPOSIÇÃO DE REJEITOS EM MINÉRIO DE FERRO NA REGIÃO
DO SEMIÁRIDO: ESTUDO DE CASO**

**NATAL
2014**

ANTONIO RAFAEL DE VASCONCELOS GALVÃO SOBRINHO

**METODOLOGIA PARA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE
DISPOSIÇÃO DE REJEITOS EM MINÉRIO DE FERRO NA REGIÃO
DO SEMIÁRIDO: ESTUDO DE CASO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Arthur Mattos.

**NATAL
2014**

ANTONIO RAFAEL DE VASCONCELOS GALVÃO SOBRINHO

**METODOLOGIA PARA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE
DISPOSIÇÃO DE REJEITOS EM MINÉRIO DE FERRO NA REGIÃO
DO SEMIÁRIDO: ESTUDO DE CASO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

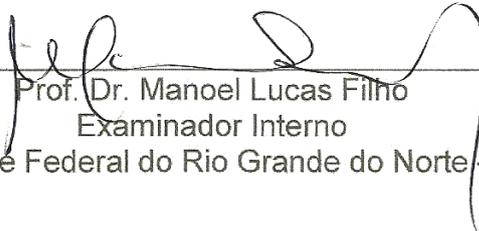
Data da Aprovação: 23 de agosto de 2014.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Arthur Mattos
Orientador

Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN



Prof. Dr. Manoel Lucas Filho
Examinador Interno

Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN



Prof. Dr. Carlos Henrique de Almeida Couto Medeiros
Examinador Externo

Universidade Estadual de Feira de Santana – UEFS

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu força e todas as condições para execução e conclusão desse trabalho.

Ao meu pai, Joaquim V. Gomes (Quincoló), que não está mais aqui para comemorar e se orgulhar da conclusão desse trabalho.

A minha mãe, Ana V. Galvão, pelo constante exemplo de trabalho, coragem, honestidade e determinação.

A minha esposa, Vera Galvão e aos meus filhos, Rafael Junior, Ana Valda e Gabriel, pela compreensão e paciência nesta árdua caminhada. As suas energias e suas compreensões foram fundamentais na construção e conclusão deste trabalho.

Ao Professor Ubiratan Pereira Galvão, pelo seu incentivo e apoio na minha entrada no Programa de Pós-Graduação ainda nos tempos de graduação.

Ao meu orientador, Professor Dr. Arthur Mattos, por sua atenção, paciência e compreensão indispensáveis à realização e à conclusão desta pesquisa.

Aos Professores, Maria Del Pilar Durante Ingunza e Manoel Lucas Filho, co-orientadores, que sempre acompanhou o desenvolvimento da pesquisa.

Pelo companheirismo, aos colegas Vera Lúcia Rodrigues Cirilo e Wédina Rodrigues de Lima.

Esta dissertação seria menos interessante não fosse a colaboração da MHAG mineração. Nas pessoas do Diretor Presidente Pio Egídio Sacchi e colaboradores.

A realização deste trabalho só foi possível devido à contribuição de todos aqueles que, de uma forma ou de outra, ajudaram na sua concretização. A todos o meu muito obrigado.

Ser velho é quem se ilude que idade é
juventude. Ser jovem é saber envelhecer.

Juca Chaves

RESUMO

Barragens de rejeitos são estruturas que tem a finalidade de reter os resíduos sólidos e água dos processos de mineração. Sua análise e planejamento iniciam com a procura do local para implantação, etapa na qual se deve vincular todo tipo de variáveis que direta ou indiretamente influenciam a obra, tais como: características geológicas, hidrológicas, tectônicas, topográficas, geotécnicas, ambientais, sociais, avaliação de riscos de segurança, entre outras. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo sobre o tipo de barramento mais apropriado e seguro para se projetar uma estrutura de disposição de rejeito de minério de ferro, levando-se em conta todas as variáveis acima citadas. O estudo de caso consiste na avaliação de sítios para localização de barragens de disposição de rejeitos de beneficiamento de ferro a ser construída na mina Bonito, no município de Jucurutu, no Seridó Potiguar. Para a seleção do local entre as alternativas, foram considerados vários aspectos do estado da arte atual, aquele que causa o menor impacto ambiental, baixo custo de investimentos, agrega valor ao produto e principalmente à segurança da estrutura implantada mitigando a preocupação com sismos induzidos e como consequência liquefação dos rejeitos, somatizados pelas barragens da região, já que a lavra da Mina Bonito encontra-se praticamente situada na bacia hidráulica da barragem Armando Ribeiro na área de proteção ambiental (APA). A metodologia utilizada compara a sismicidade induzida pelas barragens da região do semiárido com as características próprias da disposição de rejeitos e estéril, levando em conta a potencialização da liquefação pela ação da sismicidade na região da Mina Bonito. Com fulcro na metodologia, indicou-se o melhor tipo de barramento para disposição do rejeito de minério de ferro ou associação deles, para ser projetado e construído no semiárido e particularmente para a Mina Bonito. Apresenta-se, também, uma série de possíveis usos para o estéril e rejeito em atividades de engenharia, podendo gerar beneficiamento ao bem comum.

Palavras-chave: Barragem de Disposição de Rejeitos. Sismos Induzidos. Impacto Ambiental. Segurança da Estrutura. Possíveis Usos do Rejeito.

ABSTRACT

Tailings dams are structures that aim to retain the solid waste and water from mining processes. Its analysis and planning begins with searching for a location for deployment, a step in which all kinds of variables that directly or indirectly influence the work, such as geological, hydrological, tectonic, topographic, geotechnical, environmental, social characteristics, evaluation security risks, among others. Thus, this paper aims to present a study on the most appropriate and secure type of dam to design a layout structure of iron ore tailings, taking into account all the above-mentioned variables. The case study involves the assessment of sites for the location of dams for tailings disposal/beneficiation of an iron mine to be built in Bonito, in the municipality of Jucurutu in Seridó, Potiguar. For site selection among alternatives, various aspects of the current state of the art were considered, one that causes the least environmental impact, low-cost investment, adding value to the product and especially the safety of the implanted structure, which mitigates the concern about induced earthquakes as a result of liquefaction of wastes stored by dams in the region, as the tailing of Mina Bonito is located practically in the hydraulic basin dam Armando Ribeiro in an environmental protection area (APA). The methodology compares induced by dams in the semiarid region with the characteristics of the waste disposal and sterile seismicity, taking into account the enhancement of liquefaction by the action of seismicity in the Mina Bonito region. With the fulcrum in the methodology, we indicated the best dam type for disposal of tailings from iron ore or combination of them, to be designed and built in semiarid, particularly for Mina Bonito. Also presents a number of possible uses for the tailings and in engineering activities, which may cause processing to the common good.

Keywords: Dam Tailings Disposal. Induced Earthquakes. Environmental Impact. Security Structure. Possible Uses of the Tailings.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1: Principais impactos ambientais da mineração no Brasil	14
Quadro 2.1: Atividades passíveis de geração de impactos nas atividades mineiras	30
Quadro 2.2: Etapas do beneficiamento do minério de ferro e a geração de rejeitos	35
Quadro 2.3: Alguns acidentes ocorridos em barragens de contenção de rejeitos	47
Quadro 2.4: Principais causas de acidentes em barragens de rejeitos	47
Quadro 2.5: Métodos construtivos de barragens de contenção de rejeitos	62
Quadro 2.6: Comparação entre as principais características de barragens de contenção de rejeitos em função dos métodos construtivos	63
Quadro 2.7: Resumo de terremotos históricos no Nordeste do Brasil	81
Quadro 2.8: Medições a serem utilizadas para segurança estrutural e ambiental	88
Quadro 4.1: Exemplos de rupturas de barragens de contenção de rejeitos	103
Quadro 4.2: Principais causas de acidentes em barragens de rejeitos	103
Quadro 4.3: Listagem dos principais eventos sísmicos ocorridos na região de aproximadamente 300 km em torno da área de inundação do Açude Castanhão	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1:	Razões médias entre o produto final e o rejeito gerado.....	17
Figura 1.2:	Vista geral da Mina Bonito	20
Figura 2.1:	Fluxograma básico do processo de mineração de ferro.....	26
Figura 2.2:	Mina Bonito, Jucurutu/RN	28
Figura 2.3:	Concepção de fluxo gravitacional em uma pilha de rejeitos.....	35
Figura 2.4:	Seções típicas de barragens propostas pela norma sociética	37
Figura 2.5:	Método de lançamento de rejeitos (a) em ponto único; (b) em linha	40
Figura 2.6:	Modelo de utilização da ciclonação.....	41
Figura 2.7:	Limites granulométricos de suscetibilidade à liquefação.....	52
Figura 2.8:	Método de montante	54
Figura 2.9:	Método de montante com possíveis colapsos.....	55
Figura 2.10:	Posicionamento do nível freático em função das características do projeto	57
Figura 2.11:	Sequência de alteamento da barragem pelo método de jusante	58
Figura 2.12:	Método de jusante.....	59
Figura 2.13:	Sequência de alteamento da barragem pelo método de jusante	60
Figura 2.14:	Método da linha de centro.....	61
Figura 2.15:	Método da linha de centro (modificado)	62
Figura 2.16:	Construção de uma pilha de estéril pelo método descendente.....	70
Figura 2.17:	Ruptura de pilha de estéril de grande porte	71
Figura 2.18:	Construção de uma pilha de estéril pelo método ascendente.....	71
Figura 2.19:	Fase de espalhamento e compactação do material.....	72
Figura 2.20:	Deposição em “pit”: (a) Extração do minério total; (b) Deposição feita ao mesmo tempo do que extração do minério	73
Figura 2.21:	Deposição em “pit”	74
Figura 2.22:	Principais falhamentos e lineamentos da Região de Dobramentos Nordeste, com localização dos principais sismos.....	80
Figura 3.1:	O estudo de caso consistirá na avaliação de locais para localização de barragens de rejeitos de beneficiamento de ferro a ser construída na mina Bonito no município de Jucurutu, no Seridó Potiguar.....	91
Figura 3.2:	Representação esquemática opção de rota 01	93
Figura 3.3:	Representação esquemática opção de rota 02.....	93

Figura 3.4:	Rota de exportação terrestre.....	95
Figura 4.1:	Mapa de situação das grandes barragens do Nordeste.....	104
Figura 4.2:	Sismicidade e mecanismo focal no Nordeste Oriental. A letra (a) representa a região de João Câmara.....	111
Figura 4.3:	Sismicidade induzida pelo reservatório de Assú (RN). (a) Mapa com os epicentros e as tensões neotectônicas da região. Notar a distribuição NE-SW dos epicentros registrados em três períodos diferentes e o quadro atual de tensões indicado pela compressão E-W (setas vermelhas) e distensão N-S (setas amarelas). (b) Variação do nível d'água do reservatório e do número de tremores entre 1987 e 1996. Notar que de 1987 a 1989 os tremores ocorreram alguns meses após o reservatório ter atingido o seu nível máximo d'água	112
Figura 4.4:	Mapa geológico da área de São Rafael	113
Figura 4.5:	Mapa de localização das áreas estudadas	114
Figura 4.6:	Variações mensais do nível d'água (linha vermelha) e atividade sísmica (linha preta) registrada pela rede sismográfica instalada na Barragem do Açú. Os dados limnimétricos foram fornecidos pelos DNOCS, enquanto que os dados sísmicos pelo Laboratório Sismológico da UFRN	116
Figura 4.7:	Mapa de Atividades Sísmicas da área de São Rafael.	117
Figura 4.8:	Localização do açude do Castanhão. Em vermelho temos a área da localização da rede (Pe. Cícero)	118
Figura 4.9:	Mapa da localização da rede e dos epicentros com topografia. O contorno da barragem está exibido em azul. Os círculos cor-de-rosa representam os sismos mais rasos (até 1,4 km) enquanto que os quadrados vermelhos apresentam os sismos mais profundos (acima de 1,4 km). Os principais aglomerados de atividades são marcados com as elipses A, B e C	119
Figura 4.10:	Limites granulométricos de suscetibilidade à liquefação.....	122
Figura 4.11:	Limites granulométricos de suscetibilidade à liquefação.....	122

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	13
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	13
1.2 JUSTIFICATIVA DA DISSERTAÇÃO	17
1.3 OBJETIVOS E METODOLOGIA DA DISSERTAÇÃO	19
1.4 ESTRUTURA DE ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	19
CAPITULO II – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 MINERAÇÃO	21
2.1.1 Introdução	21
2.2 OPERAÇÕES MINEIRAS	22
2.2.1 Prospecção e exploração	22
2.2.2 Desenvolvimento	23
2.2.3 Lavra	24
2.2.4 Processamento mineral	25
2.2.5 Descomissionamento de empreendimentos mineiros	26
2.3 RISCO, IMPACTO E PASSIVO AMBIENTAL	27
2.4 PRINCIPAIS IMPACTOS DE MINERAÇÃO AO MEIO AMBIENTE E FORMAS DE MITIGÁ-LOS	27
2.4.1 Impacto visual	27
2.4.2 Poluição do ar	28
2.4.3 Impacto no meio hídrico	29
2.5 BARRAGENS DE REJEITOS DE MINÉRIOS DE FERRO	30
2.5.1 Estéril	30
2.5.2 Rejeitos	33
2.6 ATERROS HIDRÁULICOS	36
2.6.1 Diferenças entre barragens convencionais e barragens de rejeito	42
2.7 BARRAGENS DE REJEITO	43
2.7.1 Conceitos básicos de projeto de barragens de contenção rejeitos	44
2.7.2 Concepção do projeto de barragem de rejeitos	46
2.8 LIQUEFAÇÃO	48
2.8.1 Aspectos gerais	48
2.8.2 Aspectos condicionantes para a ocorrência da liquefação	49

2.8.2.1	Estado inicial	49
2.8.2.2	Distribuição granulométrica e formato dos grãos	50
2.9	BARRAGENS DE REJEITOS DE MINÉRIOS DE FERRO.....	52
2.9.1	Introdução	52
2.10	BARRAGENS DE REJEITO.....	53
2.10.1	Método de montante	54
2.10.2	Método de jusante	57
2.10.3	Método da linha de centro	60
2.11	CONCEPÇÃO DE PROJETO E METODOLOGIAS DE DISPOSIÇÃO DE PILHAS DE ESTÉRIL.....	63
2.11.1	Aspectos gerais de pilhas de estéril	63
2.11.2	Fase de planejamento	64
2.11.3	Investigação geotécnica dos materiais da fundação e da pilha	66
2.11.4	Estudos hidrológicos e hidrogeológicos da área	66
2.12	PROJETO EXECUTIVO DA PILHA.....	67
2.13	GEOMETRIA DA PILHA DE ESTÉRIL.....	67
2.14	ANÁLISE DA ESTABILIDADE DA PILHA DE ESTÉRIL.....	68
2.15	PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO DE PILHA DE ESTÉRIL.....	68
2.16	METODOLOGIAS DE DISPOSIÇÃO DE PILHAS DE ESTÉRIL.....	69
2.17	PILHA EXECUTADA PELO MÉTODO DESCENDENTE	70
2.18	PILHA EXECUTADA PELO MÉTODO ASCENDENTE.....	71
2.19	DEPOSIÇÃO EM “PIT” (PROCESSOS DE EXTRAÇÃO DE MINÉRIO A CÉU ABERTO).....	73
2.20	INTRODUÇÃO A TEORIA DE SISMOS.....	75
2.20.1	Tipos de sismos	75
2.20.2	O processo de ocorrência de sismos induzidos	77
2.20.3	Atividade sísmica induzida por reservatórios	78
2.20.4	Objetivos básicos da instrumentação de barragens de rejeitos do ponto de vista sísmico	82
2.20.5	Objetivos básicos da instrumentação de barragens de rejeitos do ponto de vista hidrogeotécnico	83
2.20.5.1	Instrumentação e segurança de barragem.....	85
2.20.5.2	Instrumentação para barragens de rejeitos.....	87
2.20.6	Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB)	89

CAPÍTULO III – ESTUDO DE CASO	91
3.1 LOCALIZAÇÃO DA MINA BONITO	91
3.2 ACESSIBILIDADE	92
3.3 HISTÓRICO.....	94
3.4 INFRAESTRUTURA LOCAL	95
3.5 DIREITOS MINERÁRIOS	96
3.6 GEOLOGIA.....	96
3.7 SONDAÇÃO.....	96
3.8 RESERVAS MINERAIS.....	96
3.9 PLANEJAMENTO DE LAVRA	97
3.10 LAVRA.....	97
3.11 INFRAESTRUTURA	97
3.12 USINA DE PROCESSAMENTO	98
3.13 FISIOGRAFIA.....	98
CAPÍTULO IV – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	100
4.1 PRODUÇÃO PREVISTA DE ESTÉRIL E REJEITOS DA MINA BONITO	100
4.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A ESCOLHA DO LOCAL DE IMPLANTAÇÃO DE BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS NO SEMIÁRIDO NORDESTINO.....	101
4.2.1 Análise da ocorrência do deslizamento	102
4.2.2 Sismicidade induzida pelo homem	104
4.2.3 Atividades de mineração e pedreiras	105
4.3 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	114
4.3.1 Fenômenos e casos de rupturas associados à liquefação	120
4.3.2 Variáveis influenciadoras do fenômeno da liquefação	121
4.4 SUGESTÕES PARA ESTUDO DE CASO.....	123
4.5 SUGESTÕES PARA UTILIZAÇÃO DO ESTÉRIL E REJEITOS	124
REFERÊNCIAS	128

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A inovação tecnológica em mineração tem sido um dos principais agentes de mudanças econômicas e sociais nos diversos países e o sucesso das empresas depende, cada vez mais, da eficácia com que incorporam os novos conhecimentos nos seus produtos.

Esse fato foi ressaltado, na primeira metade do século passado, por Joseph Schumpeter cuja obra enfatiza a importância das inovações e dos avanços tecnológicos no desenvolvimento das empresas e da economia (SCHUMPETER, 1970). Portanto, o interesse pela inovação é de toda a sociedade, em particular do setor empresarial.

A mineração é um dos setores básicos da economia do país, contribuindo de forma decisiva para o bem estar e a melhoria da qualidade das presentes e futuras gerações, sendo fundamental para o desenvolvimento de uma sociedade, desde que sejam operadas com responsabilidade social, estando sempre presente os preceitos do desenvolvimento sustentável.

De acordo com o atual cenário de crescimento das empresas de mineração e das unidades de produção, é cada vez mais freqüente a necessidade de aumento da produtividade e lucratividade, que é imprescindível para a permanência das empresas no competitivo mercado mundial.

A degradação do meio ambiente é um tema que vem sendo muito abordado nos últimos tempos, devido à preocupação do homem com as gerações futuras, já que o desenvolvimento econômico aliado aos fenômenos naturais tem levado, muitas vezes, à destruição do meio ambiente com grandes conseqüências à vida e o bem comum.

Um dos atores quem potencialmente geram maior impacto no meio ambiente, por sua essência, são as atividades de mineração (ver Quadro 1.1). Degrada o meio ambiente, pois, modifica o perfil topográfico da região e alhures, retira a camada fértil do solo, afetando diretamente a fauna e flora locais, causando uma série de distúrbios à sociedade e impactos sobre o solo, os recursos hídricos e a atmosfera, além de produzir grande quantidade de resíduos, materiais não comercializados produzidos durante a lavra da mina.

No entanto, apesar de degradar o meio ambiente, a atividade mineradora é de fundamental importância econômica, pois gera empregos e impostos, sendo atividade essencial às diversas indústrias.

Diante dessa problemática, surge, então, a questão de como conciliar produção, desenvolvimento, segurança e preservação do meio ambiente, tornando-se evidente a necessidade de pesquisas que busquem alternativas economicamente viáveis e que minimizem os impactos sobre o meio ambiente.

Com esse intuito, pesquisadores do mundo inteiro vêm procurando soluções criativas para problemas ambientais, apoiados por governos que procuram cada vez mais valorizar a preservação do meio ambiente, através de leis.

Quadro 1.1: Principais impactos ambientais da mineração no Brasil.

	Estado	Principais Problemas	Ações Preventivas e/ou corretivas
Ferro	MG	– Antigas barragens de contenção, poluição de águas superficiais.	– Cadastramento das principais barragens de decantação em atividade e às abandonadas; – Caracterização das barragens quanto à estabilidade; preparação de estudos para estabilização.
Ouro	PA	– Utilização de mercúrio na concentração do ouro de forma inadequada; – Aumento da turbidez, principalmente na região de Tapajós.	– Divulgação de técnicas menos impactantes; monitoramento de rios onde houver maior uso de mercúrio.
	MG	– Rejeitos ricos em arsênio; aumento da turbidez.	– Mapeamento e contenção dos rejeitos abandonados.
	MT	– Emissão de mercúrio na queima de Amálgama.	– Divulgação de técnicas menos impactantes.
Chumbo, Zinco e Prata	SP	– Rejeitos ricos em arsênio.	– Mapeamento e contenção dos rejeitos abandonados.
Chumbo	BA	– Rejeitos ricos em arsênio.	– Mapeamento e contenção dos rejeitos abandonados.
Zinco	RJ	– Barragem de contenção de rejeitos de antiga metalurgia, em péssimo estado de conservação.	– Realização das obras sugeridas no estudo contratado pelo Governo do Estado do Rio de Janeiro.
Carvão	SC	– Contaminação das águas superficiais e subterrâneas pela drenagem ácida proveniente de antigos depósitos de rejeitos.	– Atendimento às sugestões contidas no Projeto Conceitual para Recuperação da Bacia Carbonífera Sul Catarinense.

Agregados para Construção Civil	RJ	– Produção de areia em Itaguaí / Seropédica; contaminação do lençol freático, uso futuro da terra comprometido devido á criação desordenada de áreas alagadas.	– Disciplinamento da atividade; estudos de alternativas de abastecimento.
	SP	– Produção de areia no Vale do Paraíba acarretando a destruição da mata ciliar, turbidez, conflitos com uso e ocupação do solo, acidentes nas rodovias causadas pelo transporte.	– Disciplinamento da atividade; estudos de alternativas de abastecimento e transporte.
	RJ e SP	– Produção de brita nas Regiões Metropolitanas do Rio de Janeiro e São Paulo, acarretando; vibração, ruído, emissão de particulado, transporte, conflitos com o uso e ocupação do solo.	– Aplicação de técnicas menos impactantes; estudos de alternativas de abastecimento.
Calcário	MG e SP	– Mineração em áreas de cavernas com impactos no patrimônio espeleológico.	– Melhor disciplinamento da atividade através da revisão da Resolução Comana nº5 de 06/08/1987 (proteção patrimônio espeleológico).
Gipsita	PE e RN	– Desmatamento da região da Caatinga devido à utilização de lenha nos fornos de queima da gipsita.	– Utilização de outros tipos de combustível e incentivo ao reflorestamento com espécies nativas.
Cassiterita	RO e AM	– Destruição de florestas e leitos de rios.	– Racionalização da atividade para minimizar os impactos ambientais.

Fonte: Faria (2002).

As atividades de mineração geram uma quantidade significativa de estéreis e rejeitos, subprodutos inerentes ao processo de lavra e beneficiamento do minério, sendo que a disposição destes materiais afeta de forma qualitativa e quantitativa o meio ambiente. A quantidade de estéreis e rejeitos gerados numa mineração está relacionada ao método de lavra empregado, seja a céu aberto ou subterrâneo, e ao teor que o minério apresenta na rocha de interesse. De uma maneira geral, estes materiais são gerados em menor escala em minas subterrâneas, uma vez que,

normalmente, os teores do minério se apresentam mais elevados e a tonelagem de material lavrado é menor.

Neste contexto, visando minimizar os impactos ambientais e melhorar a segurança e desempenho das obras geotécnicas, existe hoje uma preocupação em dispor de forma sustentável os resíduos de mineração. A principal função de qualquer estrutura de disposição de rejeito consiste no armazenamento seguro, em longo prazo, do material proveniente do processo de beneficiamento do minério, visando minimizar os impactos sócio-ambientais e segurança. O projeto de cada estrutura e a metodologia de disposição é específico para cada mineração e levam em conta fatores operacionais e condicionantes locais.

Essa complexidade se deve a vários fatores, merecendo destaque os seguintes:

- O empobrecimento do minério tem gerado maior volume de rejeito para a mesma quantidade de produto, demandando barragens de grande porte. As estruturas geotécnicas estão adquirindo dimensões bem maiores do que aquelas construídas até final dos anos 90 e início dos anos 2000;

- As barragens estão cada vez mais distantes do ponto de geração dos rejeitos, ou seja, as instalações de tratamento de minério. Os sistemas compostos por tubulações e bombas que transportam o rejeito (sistema de adução de rejeito) até o ponto de lançamento são cada vez mais muito robustos. O mesmo acontece com a captação de água para recirculação e utilização no tratamento de minério;

- As áreas ocupadas pelas barragens de rejeito estão cada vez maiores, se aproximando do volume de acumulação das hidrelétricas, provocando dificuldades em aquisição de terras nas proximidades do empreendimento. Tendo em vista a especulação fundiária como fator adicional; e

- A necessidade de se compatibilizar aspectos ambientais, sociais e de segurança provocam custos adicionais. Os órgãos governamentais criam leis, normas e diretrizes tentando regulamentar as questões ambientais. A sociedade está mais preparada e organizada e solicita compensações para liberar a implantação de novos projetos.

Assim, estruturas de disposição de rejeitos são construídas com os seguintes objetivos específicos:

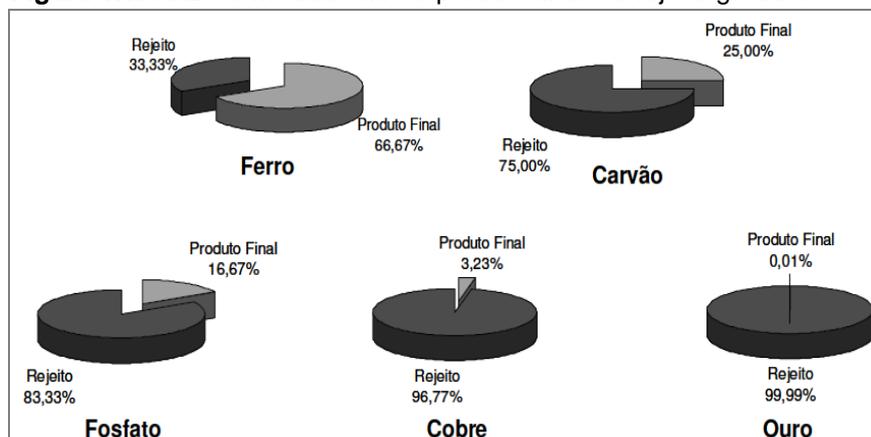
- Servir como estrutura de separação dos sólidos e da água presente nos rejeitos, através de decantação dos sólidos na bacia, e recuperação da água para o processo industrial;
- Conter e controlar a água adicional do processo e a água intersticial presente nos rejeitos e na lagoa formada no processo de deposição;
- Conter os sólidos presentes nos rejeitos que, muitas vezes, são reativos e não inertes, de forma a atender as exigências dos órgãos ambientais.

1.2 JUSTIFICATIVA DA DISSERTAÇÃO

Em face ao estágio atual de desenvolvimento das atividades relacionadas à indústria mineradora e às crescentes exigências relativas à evolução do setor extrativo mineral, a produção mineral em magnitudes crescentes resulta na geração de grandes volumes de resíduos (estéreis e rejeitos), implicando, conseqüentemente, um aumento significativo do porte das estruturas das pilhas e barragens para o seu armazenamento.

Estes impactos podem ser ponderados quando se correlacionam as razões médias entre o produto final e a geração de rejeitos de alguns dos minérios mais comumente explorados no país (Figura 1.1): ferro 2/1, carvão 1/3, fosfato 1/5, cobre 1/30 e ouro 1/10000 (ABRÃO, 1987). Assim, a implementação de estudos sistemáticos relacionados à caracterização tecnológica dos rejeitos torna-se imprescindível para se estabelecer, de forma criteriosa, as premissas de projeto de suas estruturas de contenção.

Figura 1.1: Razões médias entre o produto final e o rejeito gerado.



Fonte: Abrão (1987).

Nos últimos anos, após inúmeros acidentes causados por rupturas de barragens e pilhas de rejeitos, desde instabilizações localizadas até a ruptura global de estruturas de grande porte (casos recente citado pela mídia das minerações Rio Verde e Cataguases, por exemplo), o processo de disposição de resíduos de mineração tem sido objeto de avaliações legislativas e de intensas fiscalizações ambientais, exigindo das empresas políticas concretas de controle dos impactos da atividade mineradora sobre o meio ambiente e o bem comum.

De forma geral, os impactos ambientais associados às rupturas de sistemas de contenção de rejeitos podem interferir sobremaneira no meio físico e na biota. A modificação do relevo local, a degradação e remoção de camadas de solo superficial, a supressão e o comprometimento de áreas de vegetação, o assoreamento das águas e mananciais, a indução e aceleração de processos erosivos e de movimentos de massa secundários são exemplos destes impactos. Constitui impactos complementares o aumento da quantidade de sólidos em suspensão (turbamento dos corpos hídricos), as interferências sobre o nível freático local, a introdução de soluções ácidas e precipitação de sulfatos nas águas superficiais e subterrâneas e o comprometimento da qualidade do ar.

Cabe destacar, ainda, impactos de natureza social. São riscos associados à degradação ou comprometimento de áreas destinadas às habitações e edificações, reduções de vazão de cursos d'água, comprometimento da qualidade das águas destinadas ao abastecimento público e efeitos de vibrações. Questões socioeconômicas, inclusive associadas à perda de vidas humanas, constituem elementos preponderantes para a consideração da segurança das estruturas de contenção de rejeitos.

Dessa forma, análises de rupturas por liquefação através de sismicidade tornam-se extremamente importante como contribuição às demais análises de estabilidade existentes relacionadas às barragens e pilhas de rejeitos, justificando plenamente a proposta desta pesquisa, que é estabelecer um modelo de disposição de rejeitos que mais se adapte as condições do semiárido nordestino, particularmente a Mina Bonito em Jucurutu/RN.

1.3 OBJETIVOS E METODOLOGIA DA DISSERTAÇÃO

Com base nos aspectos do geotecnológicos e na abrangência dos impactos ambientais associados a problemas de instabilidades em sistemas de disposição de rejeitos de mineração, o trabalho proposto tem por objetivos e metodologia analisar e avaliar o potencial de liquefação de rejeitos sob carregamento estáticos (sismos induzidos), a partir de técnicas experimentais de disposição de rejeitos que serão sugeridas para as condições do semiárido nordestino. Para tal, o contexto do estudo foi focado em rejeitos de minério de ferro, provenientes do processo de beneficiamento industrial dos empreendimentos localizados na região de Jucurutu/RN.

Assim, o presente trabalho busca estabelecer uma sistemática geral de análise, com as diversas técnicas de disposição de rejeitos de minério de ferro que mais traga benefícios ao empreendimento e ao bem comum, como também a que mais se adapte ao semiárido nordestino. As estruturas de disposição são baseadas no comportamento dos rejeitos, associado às suas características intrínsecas. Estudos experimentais desta natureza visam nortear futuros projetos de estruturas de contenção de rejeitos, possibilitando estabelecer critérios de projeto e parâmetros de segurança destas estruturas quanto à susceptibilidade à liquefação por sismos induzidos.

1.4 ESTRUTURA DE ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação foi estruturada em 04 (quatro) capítulos, a partir de dados disponíveis em bibliografias específicas referentes ao tema. Concluída a revisão bibliográfica a dissertação se direcionou para o Estudo de Caso e finalmente indicar a melhor estrutura de disposição de rejeitos de minério de ferro indicada para o semiárido nordestino em específico para a Mina Bonito.

No Capítulo 01 apresenta as considerações preliminares sobre a natureza dos empreendimentos minerais, a produção de rejeitos, apresentando os objetivos e a justificativa do trabalho proposto, além de sua estrutura organizacional.

O Capítulo 02 apresenta a fundamentação teórica detalhada sobre a mineração de ferro e os rejeitos gerados no seu processo de beneficiamento industrial, enfatizando, ainda, alguns aspectos geológicos do produto ferrífero. As metodologias construtivas dos sistemas de disposição dos rejeitos também são detalhadas, bem como as propriedades geotécnicas dos rejeitos classificados como granulares.

Ainda no Capítulo 02, apresentamos a teoria dos sismos e dependendo da sua origem podem ser classificados como sismos de origem natural ou induzidos. Serão abordados vários aspectos sobre o tema e sua inferência nos projetos de barragens de rejeitos de minério de ferro, principalmente no que diz respeito à liquefação dos solos granulares do rejeito e estéril produzidos pela mineração de ferro.

Além disso, abordamos sobre a instrumentação e a auscultação de barragens com ênfase a barragens de rejeitos de minério de ferro e principalmente quando esta projetada para regiões submetidas às atividades sísmicas e perto de falhas geológicas. E também revisamos as questões ambientais com fulcro no arcabouço e técnico, abordaremos também o aspecto de segurança da barragem de rejeitos e os respectivos planos que serão imperativos de serem efetuados.

O Capítulo 03 mostra o Estudo de Caso, quando se analisa a exploração de minério de ferro pela Mina Bonito (Figura 1.2), situada no município de Jucurutu/RN, praticamente implantada dentro de Área de Proteção Permanente da Barragem Armando Ribeiro.

Finalizando com o Capítulo 04 apresentam-se as Conclusões seguidas pelas Sugestões, quando se propõem alternativas para implantação de barragens de rejeitos que se encaixe com o semiárido e para a situação específica do estudo de caso, sugestões de utilização de estéril e rejeitos agregando valor à mina e beneficiando o bem comum.

Figura 1.2: Vista geral da Mina Bonito.



Fonte: Acervo da MHAG (2013).

CAPITULO 02 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MINERAÇÃO

2.1.1 Introdução

Os processos geológicos atuantes no Planeta Terra, desde a sua remota origem há 4,7 bilhões de anos até os dias atuais, criaram em vários locais jazidas minerais de valor econômico. A humanidade necessita dos minerais destas jazidas para sobreviver, sendo que o consumo dos mesmos vem ocorrendo em escalas crescentes. Nos tempos modernos, para suprir a coletividade de minerais necessários, as empresas de mineração costumam estabelecer escritórios de exploração regionais, cujo intuito é localizar os depósitos minerais que necessitam (prospecção). Encontrado o depósito de possível interesse econômico, a próxima etapa é investigar as suas qualidades, aprofundando-se no conhecimento do mesmo, avaliando as massas mineralizadas (tonelagens) e seus conteúdos químicos (teores) e qualidades físicas, comprovando a viabilidade técnica e econômica de seu aproveitamento etc.

A mineração, representada pelos produtos por ela gerados, está presente no cotidiano da sociedade de forma relevante e praticamente indispensável. Segundo James McDivitt (*apud* ALVES, 2009), o ser humano depende, por ano, de 400 a 500 kg de insumos do reino animal e, de acordo com o nível de desenvolvimento do país onde vive, consome entre 2.000 e 20.000 kg de insumos de origem mineral. Nos Estados Unidos, considerado um dos países com melhor padrão de vida, o consumo anual per capita é de 4 145 kg de brita 3,890kg de areia e cascalho, 363 kg de cimento, 222 kg de argila, 199,5kg de sal, 140,6kg de rocha fosfática, 485,3kg de outros minerais não metálicos, **546,6kg de ferro e aço**, 24,9kg de alumínio, 10,4kg de cobre, 6,3kg de chumbo, 5,4kg de zinco, 6,3kg de manganês e 8,6kg de outros metais.

No Brasil, em menor escala, por conta de menor nível de desenvolvimento, a mineração aparece de forma constante no dia a dia dos brasileiros. De simples artigos em vidro (areia) e cerâmica (argila) a insumos para computadores e satélites, assim como na fabricação de remédios.

Atuando como base de sustentação para a maioria dos segmentos industriais, a extração mineral, hoje, desempenha papel fundamental na economia brasileira,

não só como geradoras de empregos (cerca um milhão de empregos diretos e indiretos) e impostos, como também representa fator determinante para o desenvolvimento de elevado número de cidades e micro regiões.

2.2 OPERAÇÕES MINEIRAS

Inicialmente se faz necessária a definição dos conceitos de jazida e mina. Considera-se como jazida “toda massa individualizada de substância mineral ou fósil, de valor econômico, aflorando à superfície ou existente no interior da terra”; ou seja, uma vez encerrada a pesquisa o depósito pode apresentar características econômicas que compensem sua exploração e passa a ser considerada uma jazida mineral. Se apresentar apenas uma concentração anormal de um ou mais minerais, porém sem valor econômico imediato, tem-se uma ocorrência mineral.

Taveira (1997) define mineração como o conjunto de atividades que têm por objetivo assegurar economicamente, com o mínimo possível de perturbação ambiental, a justa remuneração e segurança, a máxima utilização dos bens minerais naturais descobertos (jazidas), criando procedimentos adequados para a sua exploração e comercialização.

Um empreendimento mineiro pode envolver, em parte ou no todo, serviços compreendidos nas seguintes fases: **prospecção, exploração, desenvolvimento, lavra, processamento mineral e descomissionamento do empreendimento mineiro.**

2.2.1 Prospecção e exploração

As fases de prospecção e exploração objetivam a descoberta, caracterização e avaliação de uma ocorrência geológica e distinguem-se como procedimento de pesquisa mineral, corresponde às técnicas de procura de minérios (sem os quais a civilização moderna entra em colapso).

Segundo Maranhão (1989) prospecção compreende no planejamento dos trabalhos para a descoberta dos depósitos minerais e, também, pela programação e execução dos serviços de quantificação e qualificação das reservas, nos depósitos encontrados. O mesmo autor define as etapas do trabalho de prospecção:

- I. Seleção de áreas-alvo para detalhamento;

- II. Elaboração, acompanhamento e execução do plano de pesquisa, bem como a definição do pessoal e dos equipamentos necessários à pesquisa;
- III. Detalhamento do cronograma físico-financeiro do projeto;
- IV. Realização dos serviços geológicos/geofísicos/geoquímicos exploratórios e de detalhamento;
- V. Abertura de poços-teste e de trincheiras;
- VI. Cálculo das reservas e dos valores médios estudados;
- VII. Coleta de amostras representativas em todas as fases da prospecção;
- VIII. Verificação da viabilidade da lavra do depósito encontrado, com base nas reservas, propriedades qualitativas/quantitativas/tecnológicas do minério, determinações dos custos de exploração e dados de mercado;
- IX. Comparação dos resultados da pesquisa com os valores verificados na lavra dos setores em exploração.

2.2.2 Desenvolvimento

A alternativa de se lavar a céu aberto ou subterraneamente depende principalmente dos custos relativos de mineração. Em todas as circunstâncias, o custo tanto de capital quanto de operação devem ser considerados. A decisão correta é importante, principalmente porque comumente são feitos compromissos de venda antes de o projeto ser implantado. Não se pode perder tempo nem desperdiçar oportunidades.

Esta fase envolve os serviços necessários à preparação da jazida para a lavra, com planejamento de vias de acesso, sondagens, ventilação (no caso de lavra subterrânea), transporte, obras civis (escritórios, oficinas, refeitórios, vilas residenciais, paiol, áreas de lazer, estações de tratamento de água e esgoto, rede de captação e distribuição de águas, preparação de barragens de rejeitos etc.).

É importante observar que numa mina em atividade, podem ocorrer, simultaneamente, todas as fases citadas.

2.2.3 Lavra

Entende-se por lavra o conjunto de operações para aproveitamento econômico de uma jazida. É também a fase de extração dos bens minerais (minério) de seus locais de origem. Compreende operações de grande médio ou de pequena escala realizadas na superfície e/ou no subsolo.

O conceito de pequena, média ou grande mina depende do referencial adotado e varia conforme a região ou país. Minas consideradas de médio porte, em países desenvolvidos, podem ser consideradas de grande porte em países subdesenvolvidos. O valor da substância lavrada, as reservas, o grau de mecanização da mina, a tonelagem produzida, o número de empregados, o capital da empresa, dentre outros parâmetros, podem ser considerados nesta avaliação.

Sobre esse aspecto, vale ressaltar o fato de que pequenas minerações tendem a impactar menos, viabilizam o aproveitamento de pequenas jazidas, além de servirem para fixar a mão de obra própria da região. Além disso, contribuem para a desconcentração de centros urbanos e favorecem o desenvolvimento da região em que estiver inserida.

Como principais métodos de lavra a céu aberto, podem ser citados:

a) Lavra a céu aberto: se por um lado esse tipo de lavra permite maior aproveitamento do corpo de minério, por outro produz maior quantidade de estéril, poeiras, ruídos, e poluição das águas. O fato de esses fatores serem observados pode ser um ponto positivo para seu controle. Porém este impacto visual pode acarretar conflitos com populações vizinhas ao empreendimento e com órgãos de fiscalização.

b) Lavra subterrânea: a lavra em tela, quando bem executada, causa menor impacto ambiental, sendo que o material estéril e/ou os rejeitos da concentração podem ser utilizados como enchimento de galerias e escavações, minimizando possível passivo ambiental. Os efluentes líquidos, assim como ruídos, poeiras e vibrações provenientes da mineração, geralmente, confinados, o que torna o controle ambiental mais fácil.

c) Dragagem. Remoção de minérios do leito de rios, com a utilização de dragas. Nesse tipo de lavra, os principais impactos são a geração de sólidos suspensos, provocando turbidez e presença de óleos na água.

d) Mineração Marinha. Extração de minerais por meio de plataforma continental, com a utilização de explosivos, com posterior sucção através de bombas e/ou equipamentos especiais.

2.2.4 Processamento mineral

O minério extraído pode ser qualificado como: conjunto de minerais, dentre os quais um ou mais destes possuirá valor econômico, enquanto o restante será considerado mineral de ganga e será descartado depois de adequados processos de separação.

Alguns autores definem o processamento mineral como a capacidade de se fornecer a diferente velocidade de resposta para as espécies presentes em um determinado sistema e conseqüentemente poder separá-los.

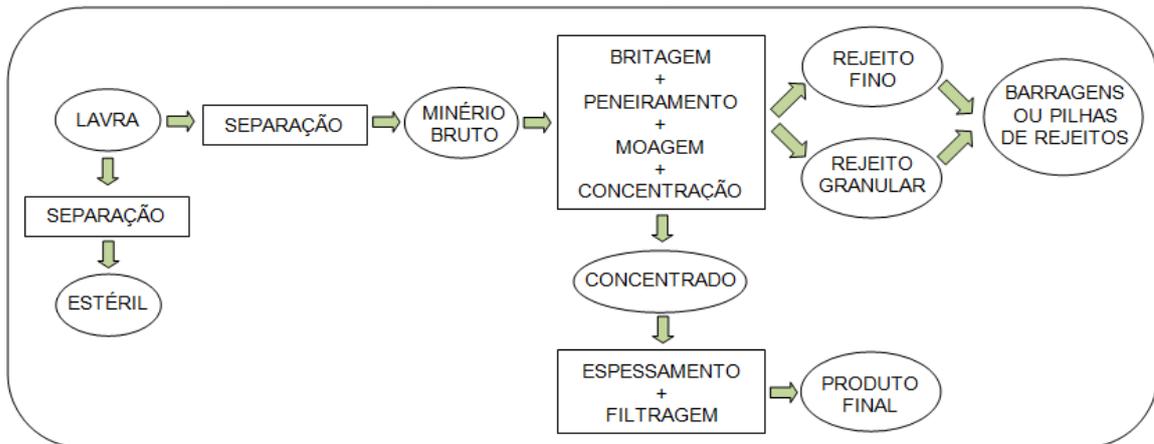
Em geral, um fluxograma de concentração inclui etapas de cominuição (britagem e moagem), classificação, a concentração propriamente dita e a etapa fina de desaguamento, ver Figura 2.1.

Os processos de concentração buscam diferenças nas espécies presentes para aplicação de determinados princípios. Os principais processos são:

- a) Gravimétricos/densitários: baseados nas diferenças de densidade;
- b) Eletroestático/dinâmico: baseados na propriedade de escoamento de cargas;
- c) Magnéticos: baseados na susceptibilidade magnética da espécies;
- d) Físico-químicos: baseados em características interfaciais das partículas minerais;
- e) Hidrometalúrgicos: baseados na solubilidade das espécies.

As etapas de beneficiamentos tendem a ser realizadas em sistemas fechados, com recirculação de água de processo e confinamento de rejeitos. Entretanto, a falta de controle de poeira, de ruídos, de reagentes, de águas de processo e estabilidade de barragens pode levar a sérios impactos ambientais.

Figura 2.1: Fluxograma básico do processo de mineração de ferro.



2.2.5 Descomissionamento de empreendimentos mineiros

Conforme citado anteriormente, a mineração corresponde a uma ocupação temporária dos terrenos onde se encontra o depósito mineral, com o objetivo de produzir os minerais que a sociedade necessita. Os bens minerais correspondem a recursos não renováveis e insubstituíveis. Os depósitos minerais se esgotam e a mineração cessa. Terminada as atividades mineiras, os terrenos devem servir para outros propósitos, como para atividades agrícolas, áreas de lazer, residência etc. Cumpre, pois à mineração deixar a área lavrada em plena forma para outros usos. A reabilitação ambiental, sem prestígio há pouco tempo, é uma das ferramentas da desativação de um empreendimento e começa a fazer parte de todos os projetos mineiros tecnicamente bem elaborados, especialmente em função de exigências legais rigorosas e, por vezes, fora da realidade.

Atualmente qualquer empreendimento mineiro é precedido de Estudos de Impacto Ambiental (EIAs) e Relatório de Impacto sobre o Meio Ambiente (RIMAs), os quais são estudos envolvendo equipes multidisciplinares.

Tais atividades de desativação programada têm a função de colocar as obras e instalações resultantes em condições tais que possam ser removidas, vendidas ou, caso permaneçam na localidade, não ponham em risco a saúde e a segurança do público e do meio ambiente promovendo o bem comum.

A área recomposta não será como a de antes das atividades mineiras; mas pode, em certos casos, ser melhorada, conforme o referencial adotado e os interesses das comunidades da região.

2.3 RISCO, IMPACTO E PASSIVO AMBIENTAL

A mineração pode ser definida como a remoção de minérios/minerais industriais da crosta terrestre para uso e serviço do homem. Como corolário desta assertiva segue que toda e qualquer atividade mineira causa alguma mudança no ambiente natural o que é referido como impacto ambiental. A extensão deste impacto pode ser quase que imperceptível até altamente obstrutiva, dependendo do minério/mineral industrial explorado, do método de lavra e processamento mineral praticado, bem como as características da mina e seus arredores.

Para entender e contornar o impacto de mineração no meio ambiente, a sequência lógica de atuar no problema seria:

- a) Avaliar a natureza e a extensão dos impactos mensurando-os segundo padrões racionais e consistentes;
- b) Estabelecer padrões e critérios aceitáveis passíveis de comparações;
- c) Comparar a medida (ou previsões) dos impactos com os padrões relevantes;
- d) Implementar ações capazes de anular os impactos ou reduzi-los dentro de padrões aceitáveis.

2.4 PRINCIPAIS IMPACTOS DE MINERAÇÃO AO MEIO AMBIENTE E FORMAS DE MITIGÁ-LOS

A natureza e a extensão de problemas ambientais decorrentes das atividades mineiras são bastante complexas e amplas em escopo, assim como as técnicas de mitigá-los. Apresenta-se a seguir, de uma maneira muito expedita, os principais impactos da mineração no meio ambiente e a forma de mitigá-los, sem a intenção de exaurir o tema.

2.4.1 Impacto visual

A mineração normalmente acarreta um impacto visual negativo. O público, em geral, na maioria dos países, quer desenvolvido quer em desenvolvimento, sentem-se visualmente incomodado com as exposições de escavações mineiras, pilhas de estéril, instalações de tratamento de minérios etc.

É muito difícil discutir os impactos visuais de trabalhos de mineração, pois se tratam de questões de ordem estética, subjetivas e muito difíceis de serem quantificadas. Em outras palavras, é muito difícil definir o que é visualmente aceitável: a Europa tende a valorizar as paisagens à medida que se aproxima dos padrões bucólicos do século XVIII, envolvendo cenários românticos, colinas verdejantes cobertas por matas secundárias ou artificiais etc. Nas Américas, privilegiam-se as paisagens mais selvagens, coberturas de mata nativa, montanhas intocadas, corpos d'água límpidos etc.

Figura 2.2: Mina Bonito – Jucurutu/RN.



Fonte: Acervo da Mineração MHAG.

No tocante a impactos visuais provocados pela mineração, cabem discussões específicas sobre três tópicos: escavações de superfície, **deposição de estéreis** e instalações de tratamentos de minério/metalurgia extrativa.

2.4.2 Poluição do ar

O homem e grande proporção dos seres vivos dependem inteiramente do ar para viver. Consomem diariamente 14 kg de ar, contra 2 kg de água e cerca de 1 kg de alimentos. A falta de ar por poucos minutos mata o ser humano que, contudo, pode sobreviver sem água ou alimentos por prazos bem maiores.

A poluição de ar causada por atividades humanas é significativa de 700 anos pra cá. A razão mais importante da instalação desse efeito negativo reporta-se à urbanização acelerada neste último século. Estima-se que por volta de 1950, metade da população do mundo era rural e metade urbana. Hoje, a distribuição é 80% urbana e 20% rural. Como resultado do crescimento da população urbana, tem-se uma relevante emissão de poluentes atmosféricos nas cidades. Nos países frios do hemisfério norte, queima-se carvão para propósito de eletricidade e aquecimento e estas instalações encontram-se às proximidades das cidades. Por estas e outras razões, as grandes cidades encontram-se bastante poluídas.

2.4.3 Impacto no meio hídrico

A água é um dos recursos mais abundantes na natureza, porém pode ser colocada em sério risco pelas atividades da mineração. A água é o meio que suporta a vida, pois em nível celular, as reações vitais se processam em solução aquosa, necessitando continuamente de água pura para não cessar a vida. Assim, o suprimento de água para vida é um dos problemas mais críticos que a humanidade deve enfrentar neste século.

A Hidrologia é a ciência que trata das águas na Terra, sua ocorrência, circulação e distribuição, bem como suas propriedades físicas e químicas além de suas reações com o meio ambiente incluindo suas relações com a vida. Hidrogeologia ou Hidrologia Subterrânea é o segmento da Hidrologia que tem a ver com o estudo e o aproveitamento da água de subsuperfície.

Levando-se em conta que os oceanos contêm água salgada, que as geleiras situam-se em elevada latitudes, nota-se que as águas subterrâneas espalhadas por todos os continentes, constituem-se efetivamente no grande manancial capaz de suprir água às diversas populações.

A indústria mineral utiliza-se apenas de uma pequeníssima parcela da água. No entanto pode interferir negativamente na circulação d'água no domínio do terreno onde se encontra instalado, interferindo na vazão das fontes e ainda provocando a poluição dos cursos d'água envolvidos. Por esta razão o impacto da mineração nos corpos d'água do entorno das minerações deve ser estudado com muito cuidado.

Quadro 2.1: Atividades passíveis de geração de impactos nas atividades mineiras.

Pesquisa e Prospecção	<ul style="list-style-type: none"> – Levantamentos topográficos. – Abertura de acessos. – Prospecção geofísica e geoquímica. – Coleta de amostras. – Sondagens – Ensaio de beneficiamento.
Desenvolvimento	<ul style="list-style-type: none"> – Decapeamento / terraplanagem. – Supressão de vegetação. – Abertura de acessos. – Remoção de camadas do solo. – Implantação de rede elétrica. – Construção de instalações industriais. – Montagem de equipamentos. – Contratação de mão-de-obra. – Disposição do estéril removido. – Sondagens.
Lavra	<ul style="list-style-type: none"> – Escavação mecânica. – Desmonte por detonação. – Desmonte hidráulico. – Carregamento e transporte. – Drenagem. – Disposição do estéril.
Beneficiamento	<ul style="list-style-type: none"> – Manutenção de máquinas e equipamentos. – Operações de britagem e moagem e classificação. – Tratamento mineral-metálico. – Disposição de rejeitos. – Armazenamento de insumos. – Tratamento de efluentes.
Atividades secundárias	<ul style="list-style-type: none"> – Geração e tratamento de efluentes líquidos e sólidos de origem industrial e doméstica. – Carregamento e transporte do minério. – Manutenção de máquinas e equipamentos de apoio. – Armazenamento e abastecimento de combustíveis.

Fonte: Modificado a partir de Sánchez (2004).

2.5 BARRAGENS DE REJEITOS DE MINÉRIOS DE FERRO

2.5.1 Estéril

O estéril é proveniente de uma camada de material sem valor comercial que se localiza acima do mineral a ser explorado. Normalmente, o mineral não fica completamente exposto, podendo ele estar parcialmente coberto com alguns pontos de afloramento ou totalmente coberto pelo estéril. Sendo assim, para que seja viável a exploração da mina, faz-se necessário a retirada deste material de cobertura ou a escavação subterrânea até chegar ao veio de minério. O estéril geralmente possui duas origens distintas, ser fruto da decomposição da rocha mãe do próprio minério ou ter origem da sedimentação de materiais distintos, proveniente de outros locais.

Ao lado do minério (agregado mineral de valor econômico), geralmente enviado à instalação de tratamento de minérios, a mina produz também estéril (rochas inúteis) que até algumas décadas atrás era basculado em pontas de aterro, nas encostas circundantes às minerações. Na cultura da época, não havia maiores preocupações tanto de ordem de geotecnia quanto de ordem ambiental. Estes depósitos eram inclusive denominados *bota foras* e eram simplesmente feitos sem quaisquer preocupações quanto às características físicas dos materiais do aterro, não se tinha cuidado com respeito a sua fundação, bem como, com a estabilidade da estrutura.

A expansão crescente da produção mineira, com o conseqüente aumento do volume de estéril, exigiu o aprimoramento dos métodos empregados para se dispor (disposição = deposição controlada) com ênfase no tratamento das fundações, garantias da estabilidade da estrutura, drenagem das águas pluviais e fluviais e minimização dos impactos no meio ambiente e segurança do empreendimento com a sociedade.

Essa mudança de mentalidade é bem apercebida pelo lançamento, por parte do Órgão Governamental, na segunda metade da década de 80, das Normas Regulamentares de Mineração, onde assinala que os estéreis depositados sem controle podem causar os seguintes problemas:

Problemas gerais:

- Ocupação física desordenada de extensas áreas;
- Aumento da acidez do solo;
- Inibição do crescimento de diversas espécies vegetais;
- Favorecimento da aridez do terreno;
- Poluição das águas superficiais e subterrâneas;
- Acidentes ecológicos decorrentes do rompimento de pilhas, precariamente construídas, sem os necessários estudos geológicos, geotécnicos e ambientais.

Problemas particulares:

- Efluentes ácidos caso a pilha tenha altos teores de sulfeto;
- Radioatividade no caso de manifestações uraníferas;
- Substâncias tóxicas oriundas de extração do ouro (cianeto, resíduos de arsênico etc.);
- Salmouras da indústria de potássio etc.

Isso posto, o DNPM e as agências estaduais do meio ambiente vêm forçando melhorias técnicas, com as seguintes direções:

- Majorar a recuperação dos minérios, evitando desperdícios que geralmente resultem em poluição;
- Garantir a produção de alta qualidade e bem controlada, evitando interrupções e acidentes na produção;
- Aprimorar as técnicas de pesquisa, lavra de minas, processamento mineral, pois minerações com tecnologias mais avançadas são mais seguras sob todos os aspectos (econômicos, ambientais etc.);
- Proteção do trabalhador quanto a saúde e acidentes do trabalho;
- Cumprimento rigoroso de legislação vigente;
- Proteção do entorno da mineração quanto a danos necessários ligados à poluição, abatimento de terrenos, erosões, interferências com outras atividades econômicas (agricultura, pecuária etc.);
- Aumento do nível de responsabilidade do período de nível técnico e gerencial da empresa etc.
- Aumento do nível de responsabilidade do período de nível técnico e gerencial da empresa etc.

As empresas de mineração entendem hoje que a disposição de estéril deve ser feita com todo o cuidado, envolvendo geralmente os seguintes passos:

- Estudo geral: abrangendo a escolha das áreas mais favoráveis à disposição dos estéreis;
- Investigação de campo e laboratório: envolvendo mapeamento geológico e geotécnico, amostragem de solos, rochas estéreis, determinação de parâmetros de resistência, sismicidade regional, e segurança do empreendimento etc.;
- Projeto básico e detalhado da estrutura;
- Implementação do projeto: envolvendo desmatamento, drenagem da fundação, deposição controlada dos estéreis, compactação, revegetação da pilha quando terminada, monitoramento etc.

2.5.2 Rejeitos

Os rejeitos são partículas resultantes de processos de beneficiamento dos minérios ferro visando extrair os elementos de interesse econômico. Sua constituição é caracterizada pela presença de uma fração líquida e sólida, com concentração de 30% a 50% em peso. Estes materiais apresentam características que são função do minério bruto e do processo industrial utilizado no beneficiamento.

Os rejeitos de mineração são os subprodutos das atividades de extração das riquezas minerais. O minério extraído durante a operação de lavra não apresenta uma concentração adequada para ser comercializado, estando composto por minerais úteis (ferro concentrado) e minerais de ganga, que corresponde à porção mineral sem valor econômico ou com pequeno valor econômico que ocorrem agregados ao mineral-minério.

O beneficiamento é responsável pela redução e regularização da granulometria, remoção dos minerais associados sem valor econômico e aumento da qualidade do produto final. O beneficiamento inicia-se com a fragmentação do mineral por meio de processos físicos de britagem e moagem. Durante estas etapas é utilizado um grande volume de água com a finalidade de resfriar o calor gerado pela energia das quebras dos blocos, sendo o produto desse processo apresentado em forma de lama. A lama, produzida na moagem, é submetida a diversos processos físicos e químicos visando à separação do produto final com características de mercado, dos materiais economicamente pobres (rejeito).

Entre esses processos pode ser citados: a separação gravimétrica, a separação magnética, a flotação, a dissolução e a pirólise, entre outros. A determinação do melhor método é função das características das jazidas exploradas e da qualidade final esperada para os minérios extraídos. Os rejeitos de mineração são os resíduos gerados diretamente na planta de beneficiamento. O beneficiamento é responsável pela redução e regularização da granulometria, remoção dos minerais associados sem valor econômico e aumento da qualidade do produto final. O beneficiamento inicia-se com a fragmentação do mineral por meio de processos físicos de britagem e moagem.

Durante essas etapas é utilizado um grande volume de água com a finalidade de resfriar o calor gerado pela energia das quebras dos blocos, sendo o produto desse processo apresentado em forma de lama. A lama, produzida na moagem, é

submetida a diversos processos físicos e químicos visando a separação do produto final com características de mercado, dos materiais economicamente pobres (rejeito). Entre esses processos podem ser citados: a separação gravimétrica, a separação magnética, a flotação, a dissolução e a pirólise, entre outros. A determinação do melhor método é função das características das jazidas exploradas e da qualidade final esperada para os minérios extraídos.

A disposição a céu aberto é a mais comum dentre as formas de disposição de rejeitos, podendo ocorrer a formação de pilhas de rejeito, no caso de descarte na forma sólida; deposição em reservatórios contidos por diques (áreas planas ou com pequenas inclinações) ou barragens (vales); ou na própria mina, em cavas e/ou áreas já lavradas. A disposição na mina compatibiliza a disposição dos rejeitos com a recuperação das áreas degradadas. Como exemplo pode ser citado a disposição de rejeitos na cava exaurida de Germano, da Samarco Mineração S.A., no município de Mariana em Minas Gerais (GOMES *et al.*, 1999) e também a Mineração Rio do Norte, na mina de bauxita de Trombetas, citada anteriormente (MELLO, 1987).

A disposição subaquática é caracterizada pelo lançamento dos rejeitos diretamente no fundo dos mares, lagos ou reservatórios projetados especificamente para a recepção desses resíduos. A sua aplicabilidade esbarra, muitas das vezes, em leis ambientais. O sistema mais usual constitui a disposição em superfície, compreendendo as pilhas e as barragens de contenção de rejeitos. Este tipo de disposição pode abranger tanto rejeitos previamente secos como na forma de polpa.

O sistema de disposição sob a forma de pilha é geralmente realizado com os rejeitos submetidos à secagem prévia. Neste caso, os materiais são empilhados com a utilização de equipamentos mecânicos específicos para tais finalidades. Alguns autores (FERRAZ, 1993; GOMES *et al.*, 1999) definem as pilhas como sendo sistemas de disposição onde o lançamento de materiais granulares sob a forma de polpa não caracteriza o acúmulo de líquidos. Neste caso, o sistema deve ser dimensionado com dispositivos de drenagens que garantam o fluxo gravitacional da fase líquida (Figura 2.3).

Figura 2.3: Concepção de fluxo gravitacional em uma pilha de rejeitos.**Quadro 2.2:** Etapas do beneficiamento do minério de ferro e a geração de rejeitos.

Fração	Método de concentração	Produto	Rejeito	Destinação do rejeito
$(6,3 < 0 < 31,5)\text{mm}$	-	Granulado	-	-
$(1 < 0 < 6,3)\text{mm}$	Jigagem	Sinte feed	Rejeito de jigagem	Pilhas de rejeitos ou moagem e incorporação ao circuito.
$(0,15 < 0 < 1)\text{mm}$	Concentração magnética ou espirais.		Produto não magnético ou rejeito de espirais	Pilhas de rejeitos ou barragens
$(0 < 0,15)\text{mm}$	Concentração magnética e/ou flotação	Pellet feed	Produto não magnético e/ou rejeito de flotação	Barragens
$(0 < 0,010)\text{mm}$	-	-	Lamas	Barragens

Fonte: Guimarães (2011).

O sistema de disposição em barragens de contenção de rejeitos consiste na técnica de lançamento dos materiais sob a forma de polpa. A disposição normalmente é executada a partir de um dique inicial de terra compactada ou de enrocamento. Na maioria dos casos, os alteamentos são executados através da técnica de aterros hidráulicos, processo consideravelmente atrativo do ponto de vista econômico, executivo e operacional.

Nas aplicações pioneiras, os rejeitos, produzidos em grandes volumes, eram descartados nos leitos dos rios, tendo os procedimentos de disposição evoluídos posteriormente para sistemas de contenções realizados sem qualquer controle, ou seja, de forma empírica. Entretanto, com o avanço das legislações ambientais e, principalmente após o registro de rupturas de barragens e pilhas de rejeitos associadas a grandes impactos ambientais, inviabilizando diversos empreendimentos, as empresas mineradoras têm atentado para conceber tais sistemas como obras de engenharia. Assim, mais recentemente, as empresas de mineração têm destinado maior interesse no sentido de atender a legislação vigente,

com enormes investimentos, buscando, dessa maneira, alternativas seguras para a contenção dos seus resíduos.

O sistema de disposição em barragens, com a utilização do próprio rejeito como material de construção tem sido utilizado com frequência pelas empresas mineradoras. Essa alternativa visa minimizar os impactos ambientais e proporcionar a redução dos custos associados com a utilização e o transporte de outros materiais de construção.

Contudo, a utilização do rejeito como material de construção para sistemas de contenção requer cuidados na consideração de variáveis fundamentais que governam o projeto, a operação e o descomissionamento (desativação) de estruturas de contenção de rejeitos. Assim, aspectos relativos à resistência ao cisalhamento, susceptibilidade à liquefação e às variáveis condicionantes ao processo final de disposição dos rejeitos devem constituir premissas de projeto.

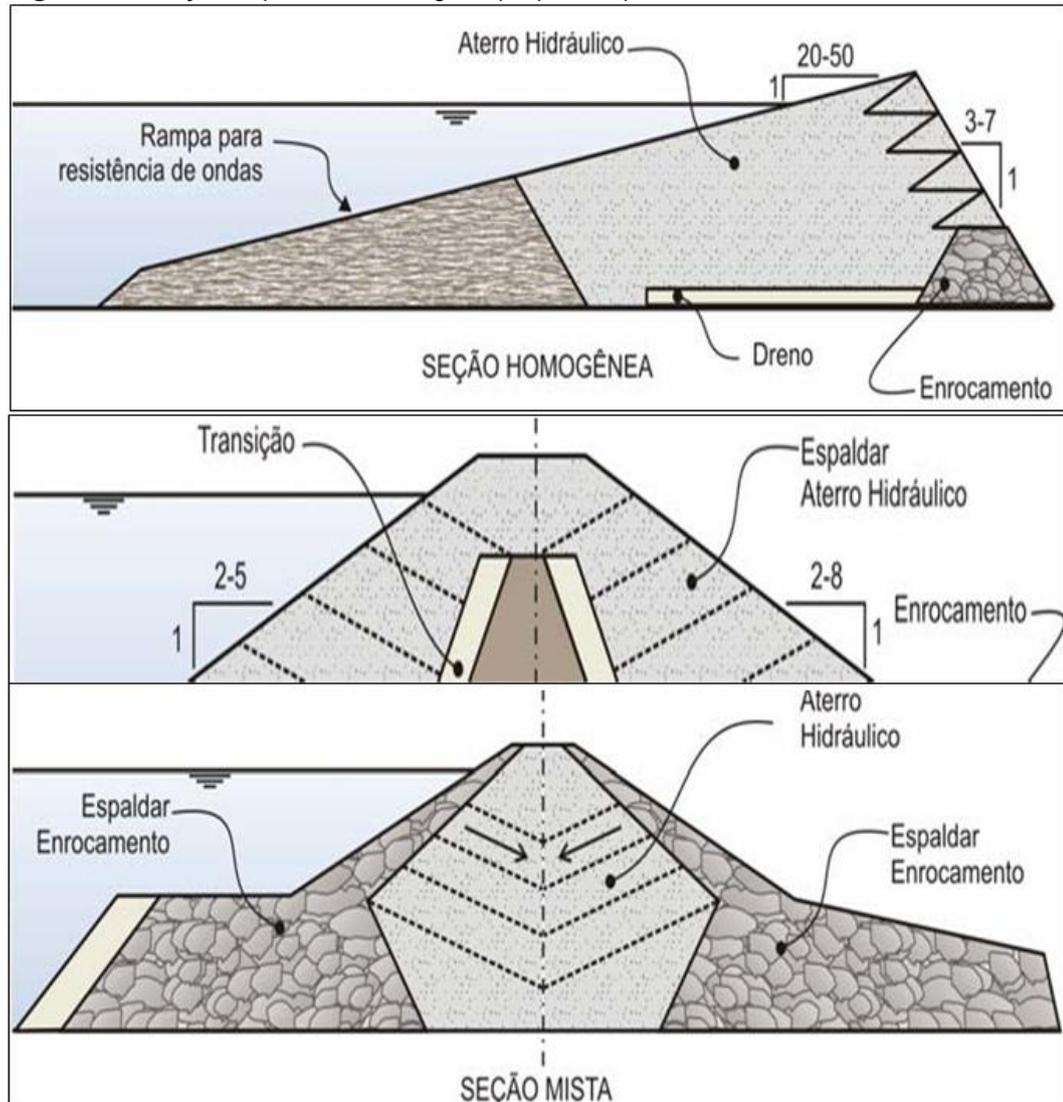
2.6 ATERROS HIDRÁULICOS

A técnica de aterros por meios hidráulicos já era utilizada nos princípios da civilização como alternativa construtiva sendo uma prática muito comum entre o povo egípcio. No início do século XX a mesma técnica era utilizada pelos americanos como uma forma alternativa e barata de transporte de areia e pedregulho, sendo responsável pela construção de grandes aterros, como barragens, que chegavam atingir mais de 80 m de altura com volume transportado de material por volta de 200 milhões de metros cúbicos.

No Brasil, a técnica de hidromecanização representou um recurso utilizado para a construção das barragens na primeira metade do século XX, seguindo basicamente o modelo norte americano. Estas estruturas apresentavam altura máxima de 30 m e foram formadas, de modo geral, a partir de um núcleo de argila siltosa e espaldares de areia lançados hidraulicamente (MORETTI; CRUZ, 1996).

No que se refere aos tipos de seções propostas pelas normas soviéticas, existem três tipos principais: as de seção homogênea construídas com materiais com coeficiente de não uniformidade (C_u) menor que 2; as de seção heterogênea com núcleo central e espaldares em areia, construídas com materiais com C_u maior que 3 e; a de seção mista, com espaldares compactados e o centro preenchido com material lançado hidraulicamente com C_u entre 2 e 3 (Figura 2.4).

Figura 2.4: Seções típicas de barragens propostas pela norma soviética.



Fonte: Modificado a partir de Morgenstern e Kupper (1998).

O potencial de ruptura de barragens devido à liquefação em areias lançadas hidráulicamente é freqüentemente considerado o maior inconveniente para o uso desta técnica construtiva. Isto é particularmente verdadeiro em áreas com atividades sísmicas e existem muitos casos reportados na literatura de liquefação em aterros hidráulicos granulares. Entretanto, existem também casos de rupturas de aterros hidráulicos reportados na literatura atribuídos ao potencial de liquefação mesmo em condições estáticas (BEEN *et al.*, 1998). A ruptura da barragem de Fort Peck, em 1938, por exemplo, foi atribuída à liquefação do espaldar de montante envolvendo uma massa de 8.000.000 m³, não sendo notificada a ocorrência de nenhum evento sísmico associado (MORETTI; CRUZ, 1996). Neste contexto, o processo de

liquefação pode ocorrer devido a alteamentos muito rápidos, vibração devido a desmonte por fogo próximo as estruturas, entre outros fatores.

Serão apresentadas algumas vantagens e desvantagens do método de construção por aterro hidráulico quando comparado com os aterros construídos por técnicas convencionais:

Grishin (1982) apresenta algumas **vantagens** do método de construção por aterro hidráulico quando comparado com os aterros construídos por técnicas convencionais:

- Alta capacidade construtiva, sendo possível executar mais de 200.000 m³ de aterro por dia;
- O método permite a execução de aterros submersos;
- Mecanismos de construção relativamente simples quando comparado com os métodos convencionais;
- Menor exigência de mão de obra humana;
- Menor custo unitário da obra;
- Aplicabilidade a uma larga faixa de materiais;
- Possibilidade de separação de partículas do material de construção.

Como **desvantagens** do método, Grishin (1982) destaca:

- Necessidade de maiores exigências em relação à composição do solo do aterro, que nem sempre se encontra disponível no local;
- Maiores cuidados quando a polpa é transportada em tubulações sob pressão;
- Grande utilização de metais, sujeitos a desgaste por atrito, que devem estar em boas condições de uso.

Apesar da grande evolução das técnicas de aterro hidráulico, bem como a sua grande faixa de aplicabilidade, vale ressaltar que alguns de seus aspectos construtivos ainda não estão bem esclarecidos, tais como mecanismo de formação do aterro e os fatores que afetam as suas propriedades. Sendo assim os projetos de aterros hidráulicos tendem a ser limitados às experiências anteriores, que nem sempre são as formas mais econômica e segura de construção (ESPÓSITO, 2000).

O processo convencionalmente adotado, em associação aos sistemas de contenção (barragens ou pilhas) de rejeitos, é a técnica de disposição em aterros hidráulicos, que consiste basicamente no transporte, na separação e na disposição

do material com a utilização de um fluido, particularmente a água, formando a chamada polpa.

Os aterros hidráulicos apresentam vantagens de ordem prática e econômica. Nos aspectos técnicos, pode-se destacar a alta taxa de construção e a separação das partículas pela segregação hidráulica. A segregação hidráulica tem efeito direto na distribuição granulométrica do depósito (MORGENSTERN; KUPPER, 1988; MORETTI; CRUZ, 1996), impondo um processo seqüencial de seleção de partículas. A ação segregadora gera, assim, enorme variabilidade estrutural, alterando significativamente os parâmetros de resistência, deformabilidade e permeabilidade do rejeito.

A polpa do rejeito, ao escoar ao longo da praia, perde velocidade e, conseqüentemente, capacidade de arraste ao longo das trajetórias de fluxo. Em princípio, portanto, as partículas maiores tenderiam a ocupar as regiões mais próximas aos pontos de lançamento favorecendo, assim, as condições de segurança de um sistema de contenção de rejeitos (VICK, 1983). Entretanto, análises específicas relacionadas aos rejeitos de minério de ferro devem levar em consideração alterações do processo de segregação hidráulica induzidas pela presença de partículas relativamente finas de ferro caracterizadas pela elevada densidade pode ser depositadas em regiões próximas aos pontos de lançamento (SANTOS, 2004).

As partículas de ferro tendem a favorecer a condição de estabilidade de uma estrutura de contenção de rejeitos. Com efeito, Presotti (2002) demonstrou que o teor de ferro exerce influência direta nos parâmetros de resistência do rejeito (maiores teores de ferro implicam maiores ângulos de atrito dos rejeitos, independentemente das características granulométricas e da sua compacidade inicial).

Outra variável particularmente crítica é a densidade do material do aterro. A obtenção de uma densidade relativamente alta constitui fator essencial para a garantia de uma condição de estabilidade da estrutura de contenção. A possibilidade de ruptura por liquefação é um fato considerável em estruturas condicionadas por aterros hidráulicos que, na maioria das vezes, apresentam características de materiais não coesivos de baixa resistência ao cisalhamento e baixa densidade *in situ*.

Por outro lado, as variações estruturais, provocadas principalmente pelos efeitos de transporte das partículas ao longo de uma praia de rejeitos depositados hidraulicamente, são praticamente impossíveis de serem reproduzidas em laboratórios de Mecânica dos Solos. Torna-se então fundamental, a viabilização do

entendimento destes mecanismos através da simulação do processo de disposição hidráulica em equipamentos especiais (RIBEIRO, 2000).

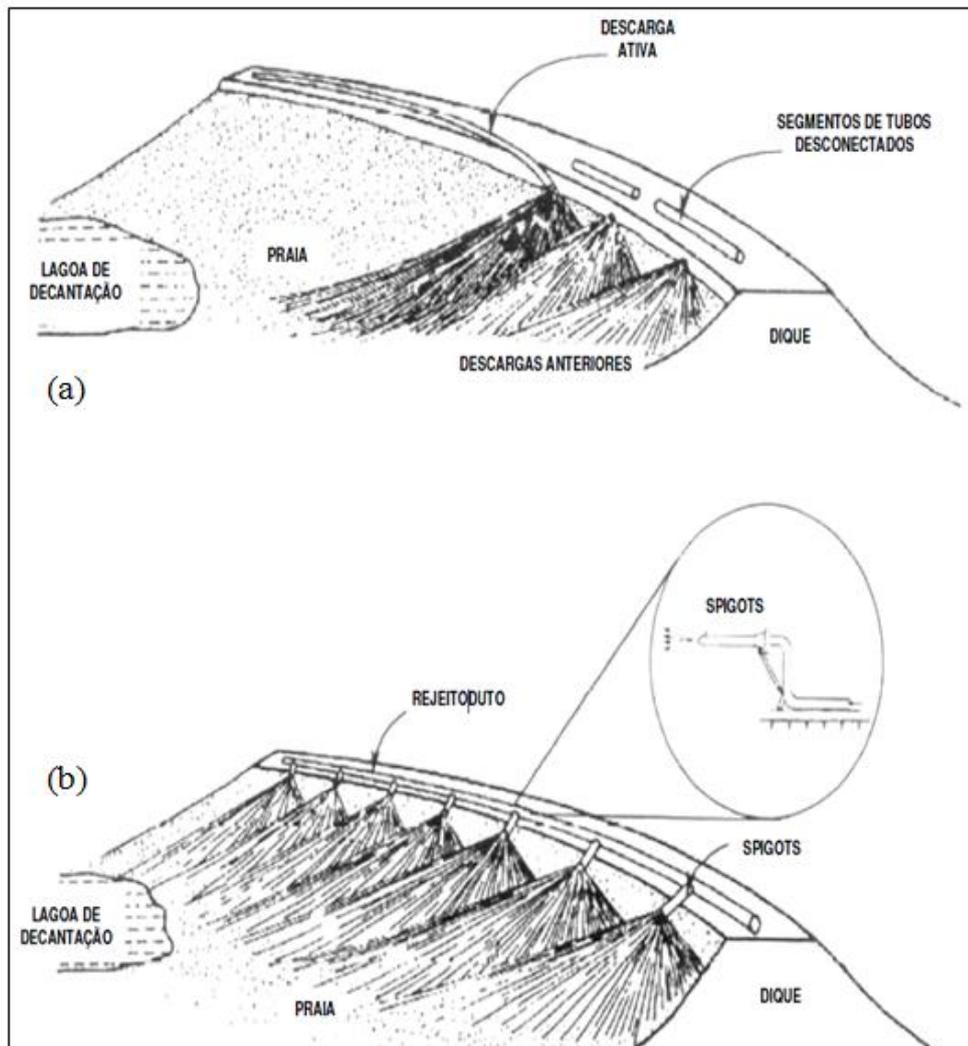
A formação do aterro hidráulico inclui duas metodologias básicas de lançamento: em ponto único (Figura 2.5) ou em vários pontos em linha, podendo ser utilizados hidrociclones ou canhões (spigots).

A utilização de equipamentos especiais, como hidrociclones, é justificada quando há necessidade de separação das frações grossa e fina do rejeito.

A implementação da técnica é condicionada por problemas específicos em relação aos aspectos construtivos e de segurança, pois existem poucas prescrições técnicas relativas a este tipo de procedimento construtivo.

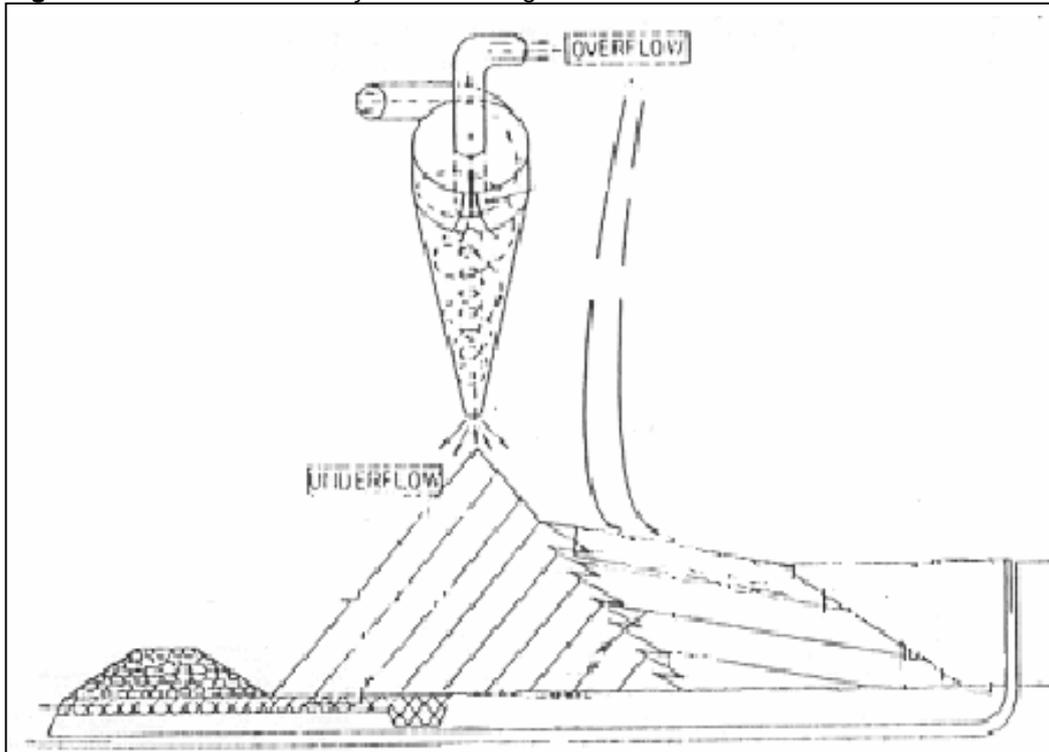
De uma maneira geral, o material é lançado de forma aleatória, não sendo estabelecido nenhum controle das variáveis que influem o processo de disposição.

Figura 2.5: Métodos de lançamento de rejeitos (a) em ponto único; (b) em linha.



A ciclonagem dos rejeitos pode ser realizada na própria unidade de beneficiamento ou próxima ao ponto de descarte. Quando realizada próxima ao ponto de lançamento, a ciclonagem é responsável pela separação do material em duas frações granulometricamente distintas, caracterizadas como *underflow* e *overflow*. A separação é realizada com base em princípios físicos por forças centrífugas, ou seja, as partículas em suspensão são submetidas a um campo centrífugo que provoca a separação. Desta forma, as partículas mais finas, em suspensão diluídas (*overflow*), tendem a ocupar a parte superior, fazendo com que o rejeito grosso, em suspensão concentrada (*underflow*), venha a ocupar a parte superior do equipamento (Figura 2.6).

Figura 2.6: Modelo de utilização da ciclonagem.



Fonte: Mello (1988).

Havendo a necessidade da realização da ciclonagem, as frações obtidas no processo são dispostas em diferentes regiões ao longo do aterro. O material *underflow*, por apresentar um melhor comportamento geotécnico em termos de resistência ao cisalhamento e permeabilidade, é lançado próximo à crista da barragem, de forma a ser aproveitado como material de construção da estrutura de contenção. Conseqüentemente, a estabilidade da barragem é aumentada, uma vez que a linha freática é afastada do dique de contenção.

2.6.1 Diferenças entre barragens convencionais e barragens de rejeito

Barragens convencionais são construídas com materiais provenientes de jazidas, com características semelhantes de densidade e umidade. A compactação das sucessivas camadas construtivas garante a homogeneidade de comportamento do maciço. O que se almeja é evitar contrastes comportamentais acentuados que possam induzir campos de condutividade hidráulica, de deformação ou de tensão. De acordo com Mello (1998), em barragens de rejeito, essa homogeneidade não é um condicionante de projeto, sendo inclusive esperada certa heterogeneidade devido às diferentes épocas de alteamento e materiais utilizados provenientes de diferentes frentes de lavra. Especialmente em barragens alteadas pelo método de montante ou de linha de centro, os alteamentos são realizados sobre rejeitos depositados em curto intervalo de tempo e conseqüentemente encontram-se pouco consolidados, apresentando menor resistência ao cisalhamento. Além disso, não existe compactação das camadas adjacentes, a não ser pelo tráfego de equipamentos durante a construção.

Assim, Assis e Espósito (1995) sugerem fazer uma analogia entre a energia de compactação em uma barragem compactada (convencional) e uma barragem alteada por aterro hidráulico. Numa barragem convencional, considerando-se um solo coesivo, a condição de compactação é definida pelos parâmetros massa específica seca e teor de umidade, para uma dada energia de compactação, definindo a massa específica seca máxima e o teor de umidade ótimo). Essa energia de compactação é definida no campo em função do peso do equipamento, do número de passadas e da altura da camada a ser compactada. Já em um aterro hidráulico, considerando materiais granulares, as variáveis que definem a energia de deposição no campo são a vazão, a concentração, a altura de queda e o espaçamento de lançamento da lama. Mantendo três dessas grandezas fixas e variando apenas uma delas, pode-se definir a massa específica máxima em função desta. Alternadamente variando as demais variáveis, obter-se-ia a otimização do sistema de deposição para uma massa específica ideal.

A exemplo da curva de compactação existe uma altura de queda ótima que define a massa específica máxima. Para alturas de queda inferiores à ótima, a energia de deposição seria insuficiente e para alturas de queda maiores que a ótima, a energia seria tanta que erodiria a praia já depositada. Embora o lançamento na

altura ótima seja desejável, na prática isto não seria exequível, pois implicaria na mudança constante da posição do canhão. Assim, segundo Assis e Espósito (1995), a exemplo da compactação de aterros, onde são definidas faixas de compactação em torno da umidade ótima, deve-se buscar uma faixa de alturas de deposição em torno da ótima, definindo uma massa específica de projeto, que implicaria em certos parâmetros de resistência e permeabilidade, de tal forma a garantir o bom desempenho da barragem.

Outra diferença notável entre barragens convencionais e barragens de rejeito é o tratamento dado à percolação pelo maciço ou pela fundação. Em barragens convencionais, a quantidade de água perdida por percolação costuma ser insignificante em comparação com os volumes utilizados na operação da obra (geração de energia, captação para uso humano ou industrial) e perdidos por evaporação e infiltração no reservatório. Desta forma, a percolação é apenas controlada, evitando geração de excessos de poro pressão e carreamento de material. O controle da drenagem se dá pela utilização de filtros verticais e tapetes drenante. Em barragens de rejeito, muitas vezes não se pode confiar na eficiência desse sistema de drenagem em longo prazo, devido a possíveis cristalizações impermeabilizantes causadas por reações químicas no rejeito. Além disso, especialmente para barragens de contenção de rejeito de minério de ferro, a água é mantida no reservatório visando apenas a sua clarificação, estando apenas o tempo necessário para garantir a decantação dos finos em suspensão. Uma vez atingidos os padrões exigidos a água pode ser lançada no curso d'água da bacia na qual a barragem foi instalada.

Em alguns casos, porém, o reservatório de rejeitos é utilizado também como reservatório de água para uso na planta de beneficiamento. Nesse caso, cuidados especiais são necessários no que diz respeito à impermeabilização do maciço.

2.7 BARRAGENS DE REJEITO

Os rejeitos produzidos cada vez em maior quantidade afetam continuamente qualitativa e quantitativamente o meio ambiente, fato que gera preocupação cada vez maior nas empresas mineradoras, que por sua vez, tentam minimizar os impactos ambientais e também os custos associados à contenção dos rejeitos, buscando então novas formas de armazenamento/disposição, para maior economia

e segurança. A opção largamente utilizada até os dias de hoje é a deposição em sistemas de barragens.

Assis (1995 *apud* PASSOS, 2009) afirma que barragens de rejeito são estruturas de contenção que retêm lama e líquido e devem constituir uma estrutura estável, juntamente com sua fundação. Devem reter inteiramente o rejeito em seu reservatório e permitir o controle adequado de toda a água percolante, para com isso garantir requisitos de controle da poluição, segurança, economia e capacidade limite de armazenamento.

Essas estruturas podem ser construídas com terra ou enroscamento, compactadas (as barragens de rejeito construídas ou alteadas com o próprio material do rejeito).

2.7.1 Conceitos básicos de projeto de barragens de contenção rejeitos

Segundo Pimenta e Espósito, os conceitos básicos de um projeto de barragem de rejeitos são apresentados a seguir:

- As barragens de contenção de rejeitos devem ser projetadas tendo como base as características dos rejeitos, dos outros materiais constituintes para o aterro, dos fatores específicos de localização, tais como, topografia, geologia, hidrologia, sismicidade e custo;
- A localização da barragem deve contemplar as considerações físicas (volume de rejeitos e área requerida para a deposição), as considerações financeiras (quantidade e custo dos materiais de preenchimento e métodos de deposição) e as considerações ambientais;
- A topografia natural é uma das considerações principais para o volume de rejeitos definido em projeto. Vales naturais e outras topografias em depressão devem ser investigados inicialmente, pois o ideal é a máxima capacidade de armazenamento com uma menor quantidade de aterro;
- A geologia local influencia na fundação da barragem, na taxa de fluxo de percolação e na viabilidade dos materiais de empréstimo para a construção da barragem. Camadas menos resistentes na fundação necessitam ser investigadas, pois podem contribuir para a ruptura do talude da barragem. O adensamento da fundação pode causar recalques apreciáveis, às vezes causando a formação de

trincas de tração que podem se tornar caminhos preferenciais de fluxo ou gerar a formação de “piping”;

- Em relação à fundação, que pode ser solo ou rocha, deve ser avaliadas sua capacidade de suporte, suas condições de percolação e deformabilidade. Devem ser avaliadas formas de tratamento, assim de controle de possíveis agentes poluidores;

- Um dos princípios básicos utilizados nos projetos de barragens de rejeitos é a manutenção da superfície freática baixa, uma vez que esta exerce uma grande influência no controle da estabilidade da mesma, em condições de carregamento estático ou dinâmico. As características de deposição dos rejeitos (permeabilidade, compressibilidade e resistência) e condições “in situ” tais como as características da fundação, a hidrologia e a hidrogeologia da área são fatores que afetam a superfície freática e conseqüentemente a estabilidade da barragem. Variações na superfície freática em barragens de rejeitos podem produzir variações na poropressão e na resistência cisalhante, podendo ser causadas pelo mau funcionamento o sistema de drenagem e por mudanças associadas ao processo construtivo;

- Sistemas de drenagem visam assegurar o controle da superfície freática. Drenos devem ser instalados para assegurar a dissipação da poropressão;

- A análise das propriedades geotécnicas do rejeito assegura a avaliação do potencial da fração granular na construção da barragem. Dependendo da granulometria e da densidade das partículas do rejeito, a ciclonagem pode ser utilizada para separar a fração granular, indicada para o corpo do barramento, por apresentar maior resistência cisalhante e maior permeabilidade;

- O conhecimento da densidade “in situ” é fundamental para a avaliação da resistência das barragens;

- De modo geral, as mineradoras escolhem os materiais e métodos que garantem a estabilidade requerida e um custo menor. Os materiais utilizados devem possuir a permeabilidade, a compressibilidade e a resistência cisalhante requeridos em projeto. Também devem ser estáveis quimicamente. O rejeito é um material muito usado na construção de barragens/aterros para contenção de rejeitos;

- O uso do rejeito como material construtivo é o método mais econômico, no entanto, entre algumas desvantagens estão a alta susceptibilidade a formação

interna de piping, a alta erodibilidade da superfície e a alta probabilidade de liquefação sobre carregamentos dinâmicos ou mesmo estáticos. Neste sentido a utilização da fração granular dos rejeitos é a mais indicada.

2.7.2 Concepção do projeto de barragem de rejeitos

A crescente geração de rejeitos tem conduzido a um aumento significativo das estruturas armazenadoras, fazendo com que, atualmente, as barragens de rejeitos encontrem-se entre as importantes obras da mineração. Concomitantemente ao aumento das dimensões dessas barragens, os vários acidentes ocorridos com as mesmas despertam a atenção da comunidade técnico-científica e de autoridades governamentais para a questão de segurança destas obras. A facilidade de operação e a inserção segura da obra no meio ambiente, associada à sua viabilidade econômica, são requisitos básicos de um sistema de disposição de rejeitos em barragens.

A disposição controlada dos rejeitos parece causar um aumento do custo de produção sem trazer benefícios imediatos para a empresa mineradora. Ademais, a tecnologia aplicada ao projeto e construção de barragens não acompanha a evolução tecnológica dos projetos de mineração, inclusive a evolução dos projetos e construção de barragens convencionais. Como consequência, esta atividade tem sido negligenciada durante muito tempo na área de mineração.

O projeto de barragens de contenção de rejeitos constitui-se em uma especialização inserida no contexto da construção de barragens convencionais. Existem, contudo, algumas diferenças fundamentais entre as tecnologias aplicadas ao projeto e construção das barragens de terra convencionais e as barragens construídas com rejeitos.

Normalmente, os materiais de construção empregados em barragens de terra são mais adequados, melhor caracterizados e passam sempre por controle de compactação. Entretanto, os materiais usados no alteamento das barragens de rejeitos sempre contêm porcentagem mais elevada de água, e os contratempos causados pela liquefação ocorrem, quase sempre, em proporções mais graves.

A construção de barragens de rejeito deve ser um processo continuado, isto é, estendendo-se por praticamente todo o período da atividade mineira, possibilitando um acompanhamento dos resultados e possíveis modificações e

aprimoramentos do projeto inicial. Desse modo, podem-se dispor, de forma segura, todos os rejeitos gerados no processamento, minimizando os riscos de acidentes.

No Quadro 2.3, constam alguns acidentes ocorridos em barragens de contenção de rejeitos, nos qual se observam os danos materiais ocasionados e associados à perda de vidas humanas.

Quadro 2.3: Alguns acidentes ocorridos em barragens de contenção de rejeitos.

Ano	Mina/Local	Causas da Ruptura	Danos Provocados
1965	El Cobre – Chile	Terremoto/liquefação.	210 vítimas, soterramento do povoado.
1970	Mufaline Mine/África	Não definida.	89 vítimas – 453.000m ³ de rejeitos saturados.
1972	Buffalo Creek/West – Virginia	Não definida.	110 mortos, 1.100 feridos, 1.500 casas destruídas – 595.000m ³ de lama.
1974	Impala Platinum África do Sul	Entubamento (piping).	12 vítimas, 3 milhões m ³ de lama fluíram por 45km, destruindo estradas, pontes e soterrando reservatório de água potável.
1985	Prealpi/Trento – Itália	Material de Construção.	Liberação de 200.000m ³ de rejeitos. 268 vítimas.
1985	Cerro Negro/Chile	Sismo induzido e liquefação.	Lama dos rejeitos fluiu até 85km a jusante.
1985	Pico s; Luiz/ Minas Gerais.	Solapamento do pé do aterro e entubamento.	Lama fluiu até 10 km a jusante. Pontes e estrada de ferro
1986	Fernandinho/ Itaminas – MG	Liquefação.	4 vítimas. Destruição de laboratórios e equipamentos.
1996	Mina do Porco/Bolívia	Entubamento (piping).	3 vítimas – Fazendas, gado, flora e fauna; 300 km do rio contaminados.

Registra-se, ainda, que entre 1970 e 1998 ocorreram 25 grandes acidentes com barragens de contenção de rejeitos. A maioria resultou de condicionantes geológicos e geotécnicos (sismos, fundações, entubamento ou *piping*, liquefação e materiais de construção, entre outros). No Quadro 2.4 consta a distribuição da frequência de acidentes, segundo suas causas.

Quadro 2.4: Principais causas e frequências de acidentes em barragens de rejeitos.

Causas	Número de Acidentes	Frequência Relativa (%)
Liquefação	21	46,7
Entubamento	11	24,4
Não definida	13	28,9
TOTAL	45	100,0

Diante das observações discutidas sobre as principais causas de acidentes em Barragens de contenção de rejeitos, entende-se que a concepção do projeto de sistema de disposição de rejeitos de mineração exige o conhecimento de todas as características dos materiais com os quais serão realizadas as obras. Além disso,

outras considerações devem ser levadas a efeito: a dinâmica construtiva, o conjunto de operações da mina e também as características do meio físico no qual as obras estarão inseridas. Em resumo, trata-se de um projeto multidisciplinar.

Na elaboração do projeto de barragem, além dos dados disponíveis, devem ser considerados os riscos associados aos custos do projeto e as disponibilidades orçamentárias.

2.8 LIQUEFAÇÃO

2.8.1 Aspectos gerais

A liquefação tem sido uma das mais pesquisadas e publicadas sub-disciplinas da mecânica dos solos, nas últimas duas décadas. Este fenômeno está diretamente relacionado ao comportamento cisalhante de solos granulares que, quando saturados e submetidos a carregamentos não drenados, podem apresentar grande redução da resistência ao cisalhamento devido ao acréscimo das poropressões.

A necessidade de estudar o fenômeno da liquefação é reforçada pelas inúmeras rupturas ocorridas em barragens, taludes naturais e fundações de obras civis que são atribuídas a este mecanismo de colapso do solo.

Os casos históricos de ruptura por liquefação evidenciam as suas conseqüências, com prejuízos materiais, perdas de vidas humanas e danos ao meio ambiente. No contexto da mineração, a relevância do estudo deste fenômeno é justificada pelas características geotécnicas apresentadas pelos rejeitos e estéril granulares.

A Liquefação é o processo de perda de resistência com a deformação apresentado por solos sem coesão, contrácteis e saturados, durante o cisalhamento não drenado. Este mecanismo é provocado pela tendência do solo em se deformar durante o cisalhamento, o que provoca variação das poropressões durante um carregamento não drenado.

De acordo com Arthur Casagrande, durante a liquefação a posição relativa dos grãos está em constante mudança, de forma que seja mantida uma resistência mínima. Uma mudança do arranjo estrutural dos grãos para a estrutura de fluxo começaria quase acidentalmente como em um núcleo e seria espalhada para a massa como uma reação em cadeia. Para Casagrande, esta estrutura existe

somente durante o fluxo, e no momento que o movimento cessa, os grãos se rearranjam e uma estrutura estática é alcançada (CASTRO, 1969; KRAMER, 1985).

2.8.2 Aspectos condicionantes para a ocorrência da liquefação

A seguir estão descritas as principais características que determinam a suscetibilidade de um determinado solo à liquefação.

2.8.2.1 Estado inicial

Conforme definido por Casagrande, o estado crítico ou estado permanente separa os solos, de acordo com as condições de índices de vazios e tensões confinantes iniciais, em suscetíveis ou não ao fenômeno da liquefação (CASTRO, 1969).

Solos com um estado inicial acima da linha de estado permanente apresentam tendência à contração e solos com um estado inicial abaixo da linha de estado permanente apresentam tendência à dilatação (KRAMER, 1985).

A seguir estão resumidos os comportamentos clássicos de areias compactas e fofas durante o ensaio triaxial, cisalhamento drenado e não drenado:

- Areia Compacta – Cisalhamento Drenado – Dilatância: uma areia com índice de vazios inicial menor do que o índice de vazios crítico, ou seja, areia compacta, durante o cisalhamento drenado, tem o seu índice de vazios aumentado até alcançar o valor do índice de vazios crítico.

- Areia Compacta – Cisalhamento não Drenado – Geração de poropressões negativas: uma areia compacta durante o cisalhamento não drenado tem sua tensão efetiva aumentada até o valor correspondente à tensão efetiva para o qual o índice de vazios críticos é igual ao índice de vazios inicial da amostra.

- Areia Fofa – Cisalhamento Drenado – Contração: uma areia com índice de vazios inicial maior do que o índice de vazios crítico, ou seja, areia fofa, durante o cisalhamento drenado, tem o seu índice de vazios reduzido para o índice de vazios crítico.

- Areia Fofa – Cisalhamento não Drenado – Geração de poropressões positivas: uma areia fofa durante o cisalhamento não drenado tem sua tensão efetiva reduzida para o valor correspondente à tensão efetiva para o qual o índice de vazios

crítico é igual ao índice de vazios inicial da amostra. A resistência ao cisalhamento da areia é então reduzida para um valor que é somente uma função de seu índice de vazios inicial. Esta é a situação em que o solo está propenso a desenvolver a liquefação.

– Solos com parâmetro de estado positivo, ou seja, com estado inicial plotado acima da linha de estado permanente, são suscetíveis à liquefação enquanto que solos com parâmetro de estado negativo não são suscetíveis à liquefação.

2.8.2.2 Distribuição granulométrica e formato dos grãos

A distribuição granulométrica e o formato dos grãos são fatores que têm influência significativa no potencial de liquefação de um determinado solo.

Antes, acreditava-se que a liquefação estava restrita apenas a depósitos de areia. Entretanto, tem sido observada a liquefação em siltes não plásticos e até em pedregulhos, tanto em laboratório quanto no campo (CÁRDENAS, 2004).

A ocorrência do fenômeno em solos grossos está associada à presença de camadas adjacentes menos permeáveis impedindo a dissipação do excesso de poropressões.

De acordo com Kramer (1996 *apud* CARRARO *et al.*, 2003), solos bem graduados são geralmente menos suscetíveis à liquefação do que aqueles com graduação uniforme pois o preenchimento dos vazios formados entre as partículas de tamanhos diferentes resulta em um menor potencial de alteração de volume sobre condições drenadas e conseqüentemente, menores excessos de poropressão em condições não drenadas.

Por outro lado, Yamamuro e Lade (1997) afirmam que areias puras sempre apresentam resistência à liquefação maior do que areias com finos. Conforme citado em Thevanayagam *et al.* (2000), Aubertin *et al.* (2003) sugerem duas explicações para este comportamento: A primeira é que a presença de mais partículas finas reduz a condutividade hidráulica do solo, dificultando o alívio do excesso de poropressões. A segunda é que a presença de partículas finas prejudica a interação entre os grãos de solo Bray *et al.* (2004) observam que não é a quantidade de partículas com granulometria fina (passante na peneira de número 200) que melhor indica a suscetibilidade de um solo à liquefação, e sim a quantidade de argilo-minerais.

Dessa forma, o índice de plasticidade (IP) do solo seria um melhor indicador, o que está de acordo com os estudos de Carraro *et al.* (2003), que analisou o comportamento de areias puras e areias siltosas. Boulanger e Idriss (2004, 2006 *apud* ANDERSON *et al.* (2007) utilizam o índice de plasticidade para a diferenciação entre solos com comportamento da areia e solos com comportamento da argila. Para estes pesquisadores, solos com IP maior do que 7% podem ser classificados como não suscetíveis à liquefação, por apresentarem comportamento de argila.

De acordo com Terzaghi *et al.* (1996), o potencial de liquefação de areias com teor de finos maior do que 5% depende da quantidade e da plasticidade dos finos, pois os finos plásticos impedem a separação dos grãos de areia durante um carregamento, garantindo um aumento da resistência à liquefação.

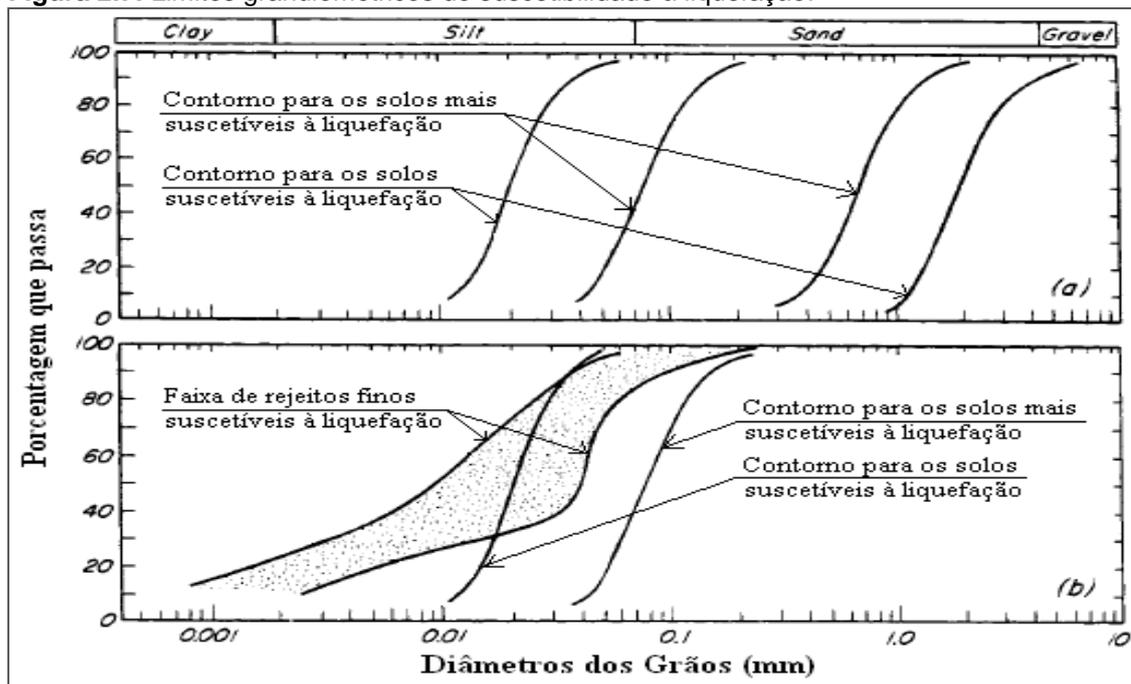
Ishihara (1993) atribui a grande resistência à liquefação de areias, contendo siltes plásticos, à coesão dos finos. Este mesmo autor, em seu trabalho publicado dois anos mais tarde (Ishihara, 1995), observou que rejeitos areno-siltosos são suscetíveis à liquefação devido à natureza não plástica dos finos presentes.

Troncoso e Verdugo (1985 *apud* BRAY *et al.*, 2004), estudaram rejeitos areno-siltosos não plásticos e concluíram que a presença de finos entre os grãos de areia reduz as forças de contato, diminuindo a resistência do solo.

De uma maneira geral, o teor de finos influencia na suscetibilidade à liquefação de duas maneiras distintas. Se por um lado a presença de finos plásticos reduz a permeabilidade do solo, por outro esta presença contribui para a resistência ao cisalhamento, devido ao acréscimo de coesão. Entretanto, no caso de solos formados por finos não plásticos, a influência é apenas negativa, com um aumento da suscetibilidade à liquefação causada pela redução da condutividade hidráulica.

O formato das partículas também influencia a suscetibilidade à liquefação. Solos com partículas arredondadas são mais compressíveis do que aqueles com partículas de formato angular (KRAMER, 1996 *apud* CARRARO *et al.*, 2003). A força de atrito entre grãos angulares é maior devido ao melhor entrosamento, resultando em uma maior resistência ao cisalhamento.

Figura 2.7: Limites granulométricos de suscetibilidade à liquefação.



Fonte: Modificado de Terzaghi *et al.* (1996).

Baseado em ensaios granulométricos em solos que sofreram e não sofreram liquefação, Tsuchida (1970 apud TERZAGHI *et al.*, 1996), propôs as curvas de contorno da distribuição granulométrica apresentadas na Figura 2.7(a). O contorno inferior reflete a influência dos finos plásticos que reduzem a possibilidade das areias de contraírem durante o cisalhamento.

De acordo com a Figura 2.7(a), depósitos de solo natural com D50 menor do que 0,02 mm ou maior do que 2 mm não são suscetíveis à liquefação. Por outro lado, de acordo com Terzaghi *et al.* (1996), rejeitos de mineração são altamente suscetíveis à liquefação, embora contenham uma significativa quantidade de partículas com tamanho de silte e argila, porque estes finos são compostos de sólidos não plásticos. Na Figura 2.7(b) está apresentada a faixa granulométrica para os rejeitos de granulometria fina com suscetibilidade à liquefação (TERZAGHI *et al.*, 1996).

2.9 BARRAGENS DE REJEITOS DE MINÉRIOS DE FERRO

2.9.1 Introdução

Até dois terços do século passado, os rejeitos eram dispostos empiricamente levando em conta predominantemente a forma que agregasse menor custo de

disposição (VICK, 1983). Este tipo de filosofia gerou um impasse ambiental enorme por parte das mineradoras, que praticamente jogavam seus rejeitos diretamente nos rios. Devido a tal fato do passado, atualmente existe uma crescente pressão de órgãos ambientais para que a disposição do rejeito gere o menor impacto possível ao meio ambiente e com menor risco de acidente. Além disso, as mineradoras vêm sofrendo dificuldades cada vez maiores para liberar novas áreas de deposição de rejeitos, o que torna imprescindível a metodologia utilizada na elaboração de novos projetos que devem ser economicamente atrativos e ao mesmo tempo seguros.

Uma das formas mais econômicas de transporte de rejeito é por meio hidráulico e tal processo de disposição é largamente utilizado pelas empresas mineradoras, dado ao volume cada vez maior de rejeitos gerados. Contudo, a elaboração de projetos otimizados e seguros para a técnica do aterro hidráulico não é uma tarefa simples, uma vez que as características geotécnicas do rejeito variam de acordo com a frente de lavra explorada bem como o processo de beneficiamento empregado, gerando uma grande heterogeneidade no material constituinte da barragem.

Por esse motivo, o processo de aterro hidráulico já foi discutido por vários autores, sendo tema de diversas pesquisas e estudos, destacando Klohn (1982), Vick (1983), Kupper (1991) e Krause (1997), além das diversas dissertações de mestrado e teses de doutorado desenvolvidas na linha de pesquisa Geotecnia Aplicada à Mineração pelas Universidades brasileiras, ao longo dos últimos quinze anos.

Além da variabilidade proveniente do processo de exploração e beneficiamento, o rejeito pode possuir diferentes características granulométricas, mineralógicas e estruturais, que serão função das variáveis que controlam o processo de descarga da lama (ASSIS; ESPÓSITO, 1995). Se tais características não forem abordadas no projeto e verificadas durante o processo construtivo da barragem, a estrutura do barramento pode correr riscos de ruptura, podendo gerar não apenas um grande impacto ambiental negativo, mas também morte de pessoas.

2.10 BARRAGENS DE REJEITO

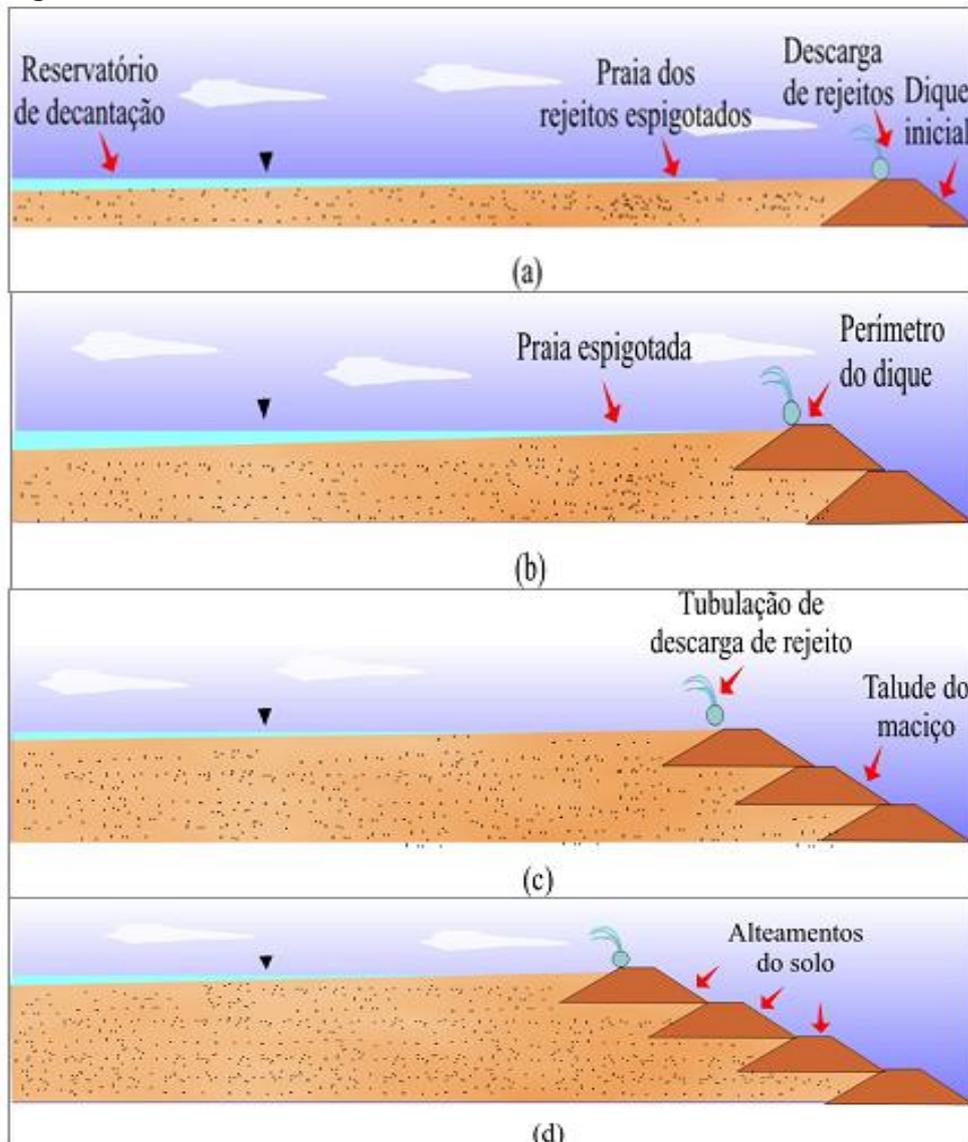
As barragens de rejeito podem ser construídas com material compactado proveniente de áreas de empréstimo, ou com material do próprio rejeito, partículas de granulometria mais grossa, que podem ser separadas pelo processo de ciclonagem. As barragens de Rejeito construídas ou alteadas com o próprio material

do rejeito podem ser construídas pelos métodos: Método de Montante; Método de Linha de Centro e Método de Jusante.

2.10.1 Método de montante

Na Figura 2.8 é apresentado o método de montante. Inicialmente é construído o dique de partida e nos alteamentos o eixo da barragem se desloca para montante.

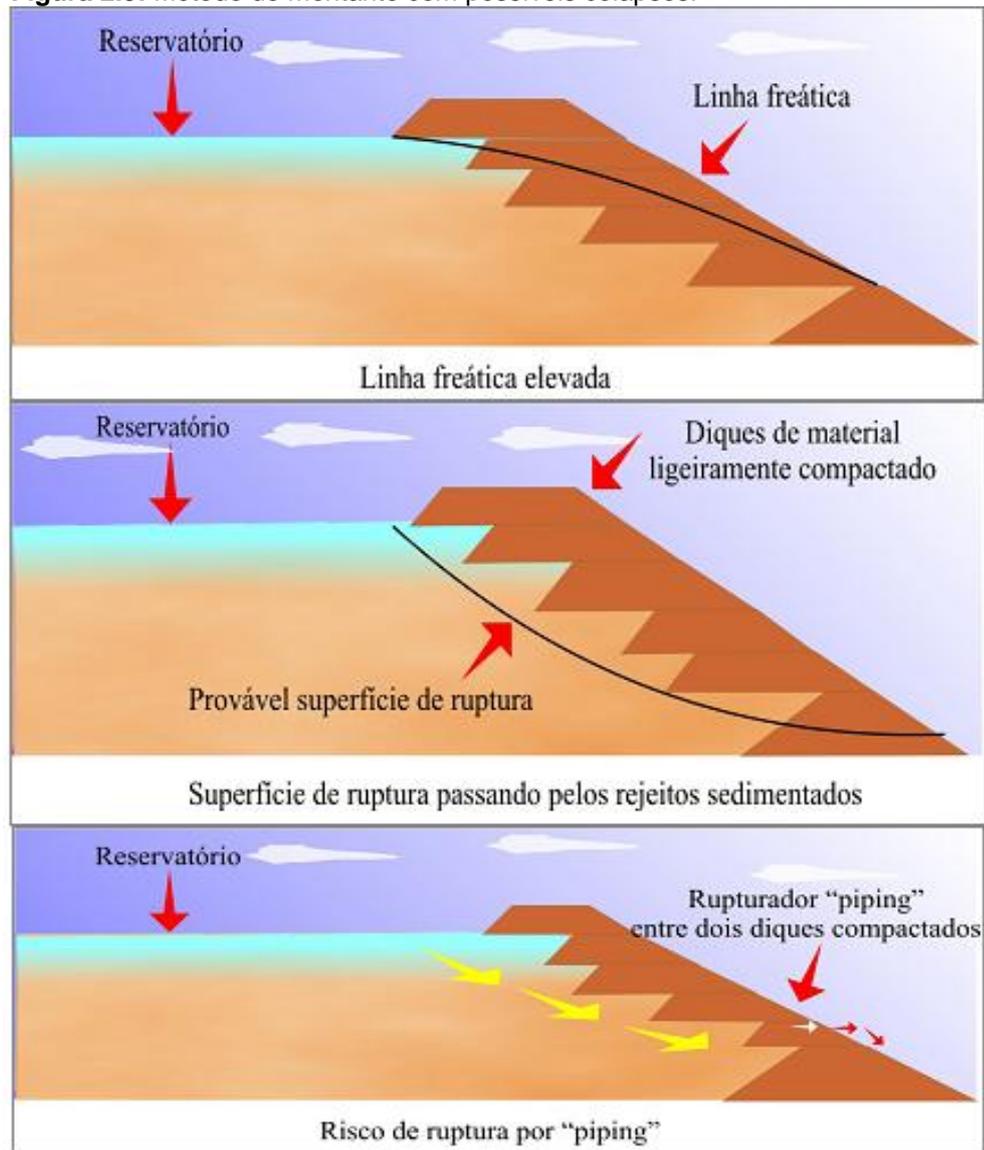
Figura 2.8: Método de montante.



Fonte: Soares (2010).

Cumprе ressaltar que essas barragens são suscetíveis de colapso por liquefação, principalmente em regiões sujeitas a **abalos sísmicos**, como é fatível de acontecer no semiárido e será demonstrado com o estudo de caso.

Figura 2.9: Método de montante com possíveis colapsos.



Fonte: Soares (2010).

As vantagens e desvantagens deste método são destacadas a seguir.

Vantagens:

1. Menor custo de construção;
2. Maior velocidade de alteamento;
3. Menores volumes na etapa de alteamento;
4. Pouco uso de equipamentos de terraplenagem.

Desvantagens:

1. Menor coeficiente de segurança, em função da linha freática, em geral, situada muito próxima ao talude de jusante (Figura 2.9a);
2. A superfície crítica de ruptura passa pelos rejeitos sedimentados, porém não devidamente compactados (Figura 2.9b);

3. Há possibilidade de ocorrer entubamento, resultando no surgimento de água na superfície do talude de jusante, principalmente quando ocorre concentração de fluxo entre dois diques compactados (Figura 2.9c);

4. Há risco de ruptura provocado pela liquefação da massa de rejeitos, por efeito de sismos naturais ou induzidos e vibrações causadas por explosões ou movimentação de equipamentos.

Dentre os cuidados e aplicação de medidas relacionadas a este método com o propósito de melhorar a segurança e desempenho da obra, são normalmente recomendados os cuidados a seguir:

- O lançamento dos rejeitos deve ser feito no perímetro do lago, imediatamente a montante do talude do dique inicial e dos alteamentos subsequentes.

- Devem-se evitar retenções de água próximo à crista ou em áreas confinadas, por meio de um plano de lançamento de rejeitos e das manobras da tubulação de seu lançamento.

- Os rejeitos devem ter fração arenosa, para favorecer a drenagem e serem lançados com uma concentração de sólidos que possibilite a segregação do material próximo à crista da barragem.

- O nível de água do reservatório deve ficar afastado da crista da barragem, adotando-se sistemas para esgotamento das águas de chuvas e aquelas liberadas pela polpa.

- Em áreas que ocorram vibrações, sejam de origem tectônica (sismos naturais) ou provocadas por desmonte com explosivo na mina ou, ainda, por passagem de veículos (sismos induzidos), recomenda-se que o alteamento por este método seja descartado.

- As barragens não deverão ter grande altura, e a velocidade de alteamento fica condicionada às propriedades dos rejeitos, visto que a segurança da barragem depende da resistência mobilizável dos rejeitos, que é condicionada pelas pressões neutras. Estas pressões estão relacionadas à velocidade de aumento das sobrecargas provocado pela velocidade de alteamento da barragem e pela velocidade de dissipação das pressões neutras.

- A estabilidade destas obras é também ditada pelo avanço do lago de decantação, que pode elevar a superfície do nível freático no corpo da barragem,

fazendo a água atingir as partes altas do talude de jusante da barragem, possibilitando o estabelecimento do processo de entubamento (Figura 210a).

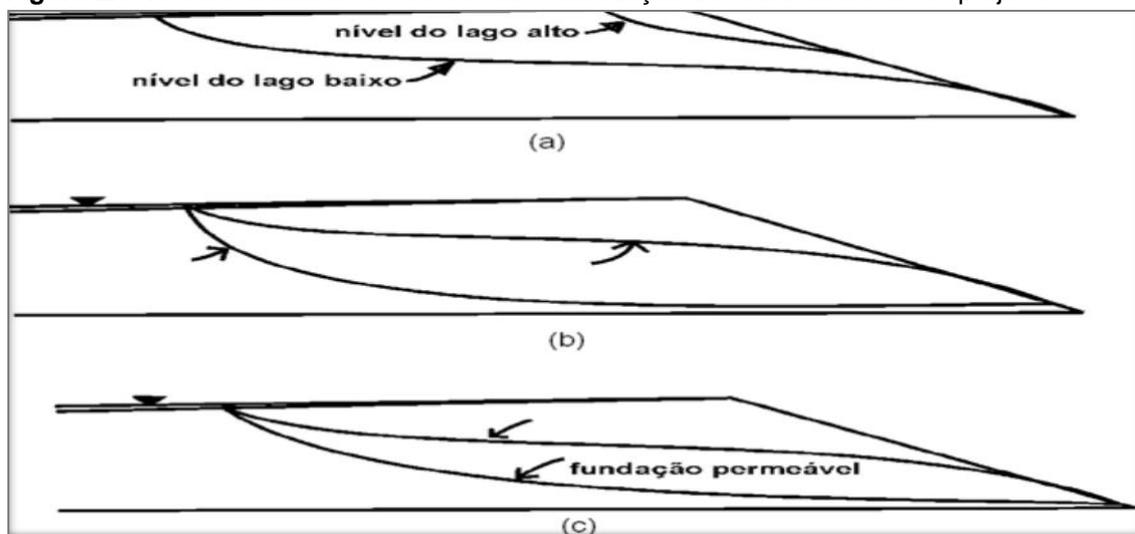
– Normalmente praias com baixa segregação dos rejeitos lançados, entubamento, baixa permeabilidade, ocasionam a elevação do nível freático no corpo da barragem, podendo, neste caso, também ocorrer entubamento causado pela surgência d'água no talude de jusante da barragem (Figura 2.10b).

– O nível freático poderá também elevar-se caso as fundações da barragem sejam impermeáveis. Neste caso, a passagem da água ocorre apenas pelo corpo do barramento, podendo provocar o surgimento de água no talude de jusante, o que possibilita a formação de entubamento (Figura 2.10c).

– Deve-se tratar o talude de jusante contra erosões provocadas pela ação de chuvas, à medida que a barragem vai sendo alteada. Este tratamento compreende a condução das águas por meio de canaletas e caixas de passagem. Por último, deve-se proceder à proteção superficial por cobertura vegetal.

– O monitoramento da obra deve ser feito durante todo o período de alteamento, continuando na fase de desativação. Ou seja, trata-se de uma ação continuada.

Figura 2.10: Posicionamento do nível freático em função das características do projeto.



Fonte: Nible (1986).

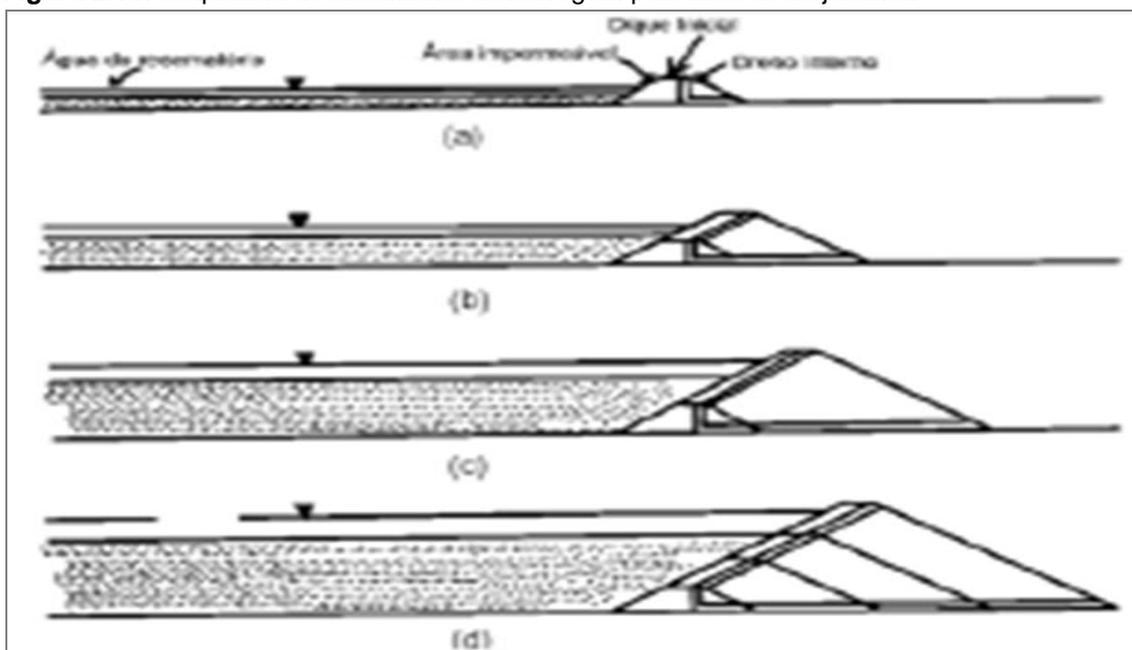
2.10.2 Método de jusante

No método de jusante, a linha do centro (eixo da barragem), se desloca a jusante durante os processos de alteamentos. Também neste método se faz necessária a construção de um dique inicial, impermeável, empregando-se

normalmente material argiloso compactado. Este dique inicial deve ser dotado de drenagem interna (filtro vertical e tapete drenante), além de ter seu talude de montante impermeabilizado com argila compactada ou mantas plásticas específicas para impermeabilização.

Nesse método somente os rejeitos grossos são utilizados no alteamento, e a barragem pode ser projetada para grandes alturas, incorporando sempre, neste alteamento, o sistema de impermeabilização e drenagem. Os rejeitos são hidrociclados, e o *underflow* é lançado no talude de jusante sobre compactação e controle construtivo. Um diagrama esquemático com os principais elementos deste método de construção, além da seqüência de alteamento, pode ser visualizado na Figura 2.11.

Figura 2.11: Sequência de alteamento da barragem pelo método de jusante.



Fonte: Vick (1983).

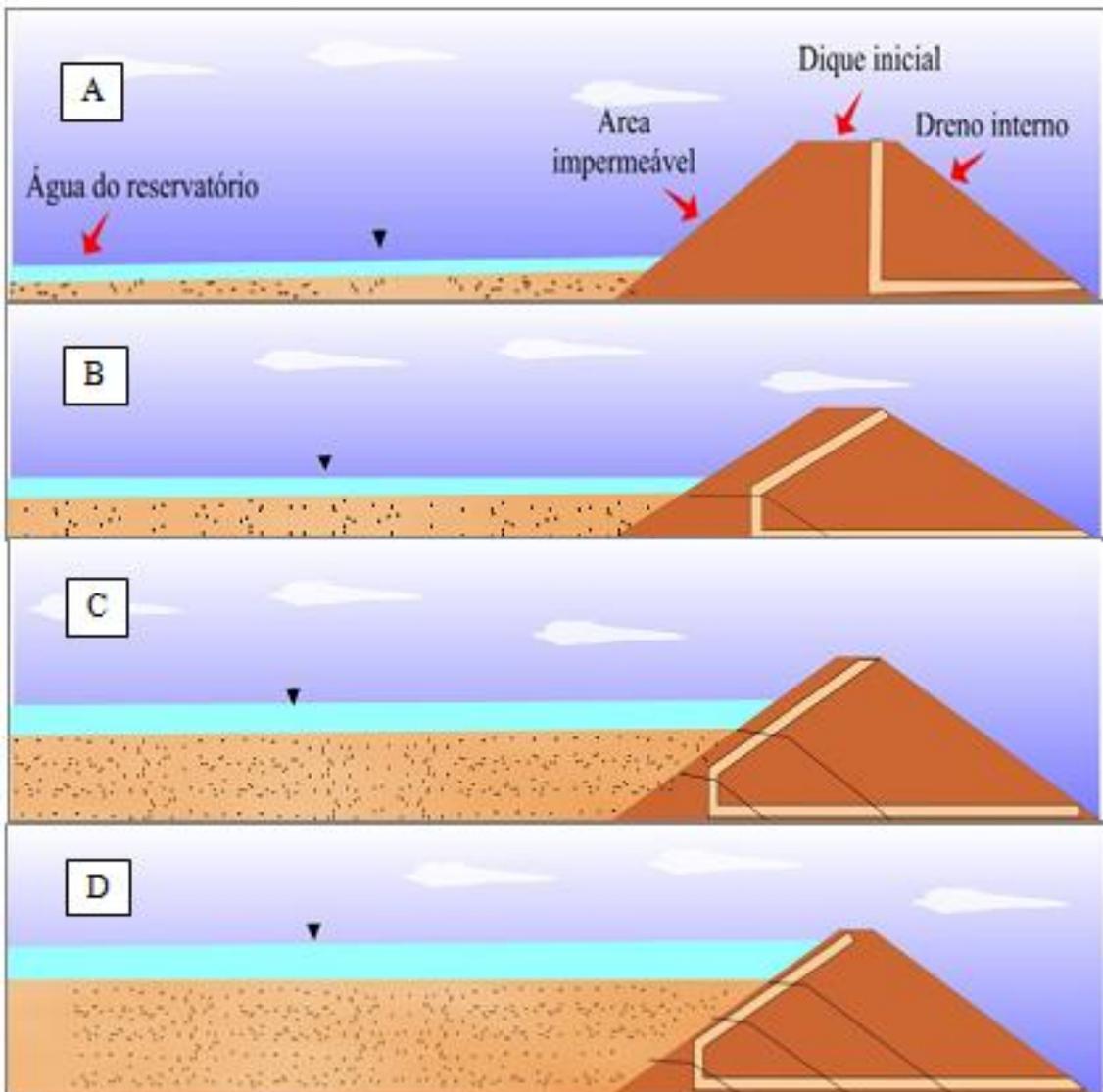
Como vantagens deste método podem ser assinaladas:

1. Maior segurança por alteamento controlado;
2. Menor probabilidade de entubamento e de rupturas horizontais, em consequência da maior resistência ao cisalhamento;
3. Maior resistência a vibrações provocadas por sismos naturais e vibrações em razão do emprego de explosivos nas frentes de lavra;
4. Instalação de sistema de drenagem e impermeabilização, à medida que se processa o alteamento.

As principais desvantagens do método são:

1. Custo mais elevado;
2. Maior volume de material a ser movimentado e compactado;
3. Menor velocidade de alteamento da barragem;
4. Não possibilita a proteção com cobertura vegetal e tampouco drenagem superficial durante a fase construtiva, devido à superposição dos rejeitos no talude de jusante;
5. Requer o emprego de hidrociclones e a construção de enrocamento de pé para conter o avanço do *underflow*;
6. Requer a construção de dique à jusante para contenção dos materiais do *underflow*.

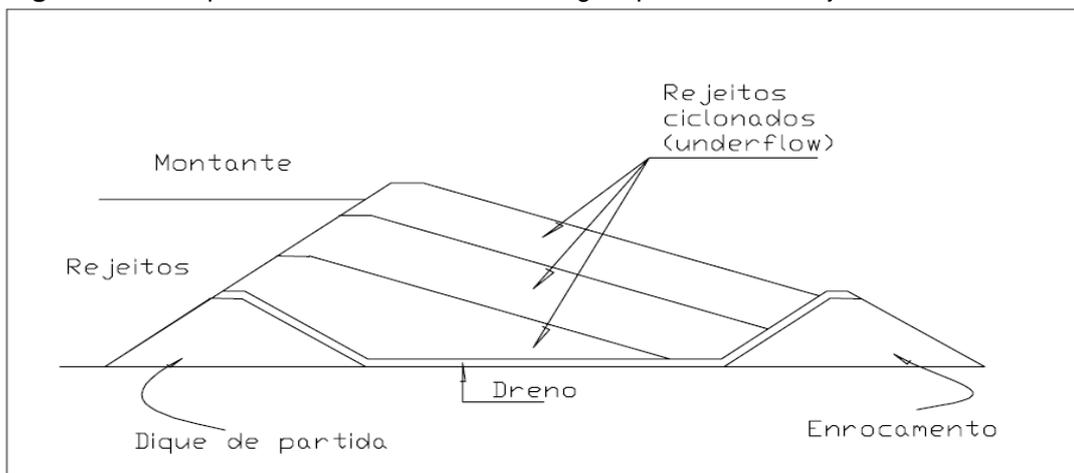
Figura 2.12: Método de jusante.



Fonte: Soares (2010).

Na Figura 2.13 é apresentada outra maneira do método da jusante; é chamado assim por que nos alteamentos o eixo da barragem se desloca para jusante. É construído um dique inicial impermeável, o qual deve ter uma drenagem interna, composta por filtro inclinado e tapete drenante. O talude interno da barragem ou talude de montante, nos alteamentos, é impermeabilizado. A drenagem interna e a impermeabilização do talude de montante não são obrigatórias se os rejeitos possuem características de alta permeabilidade e ângulo de atrito elevado.

Figura 2.13: Sequência de alteamento da barragem pelo método de jusante.



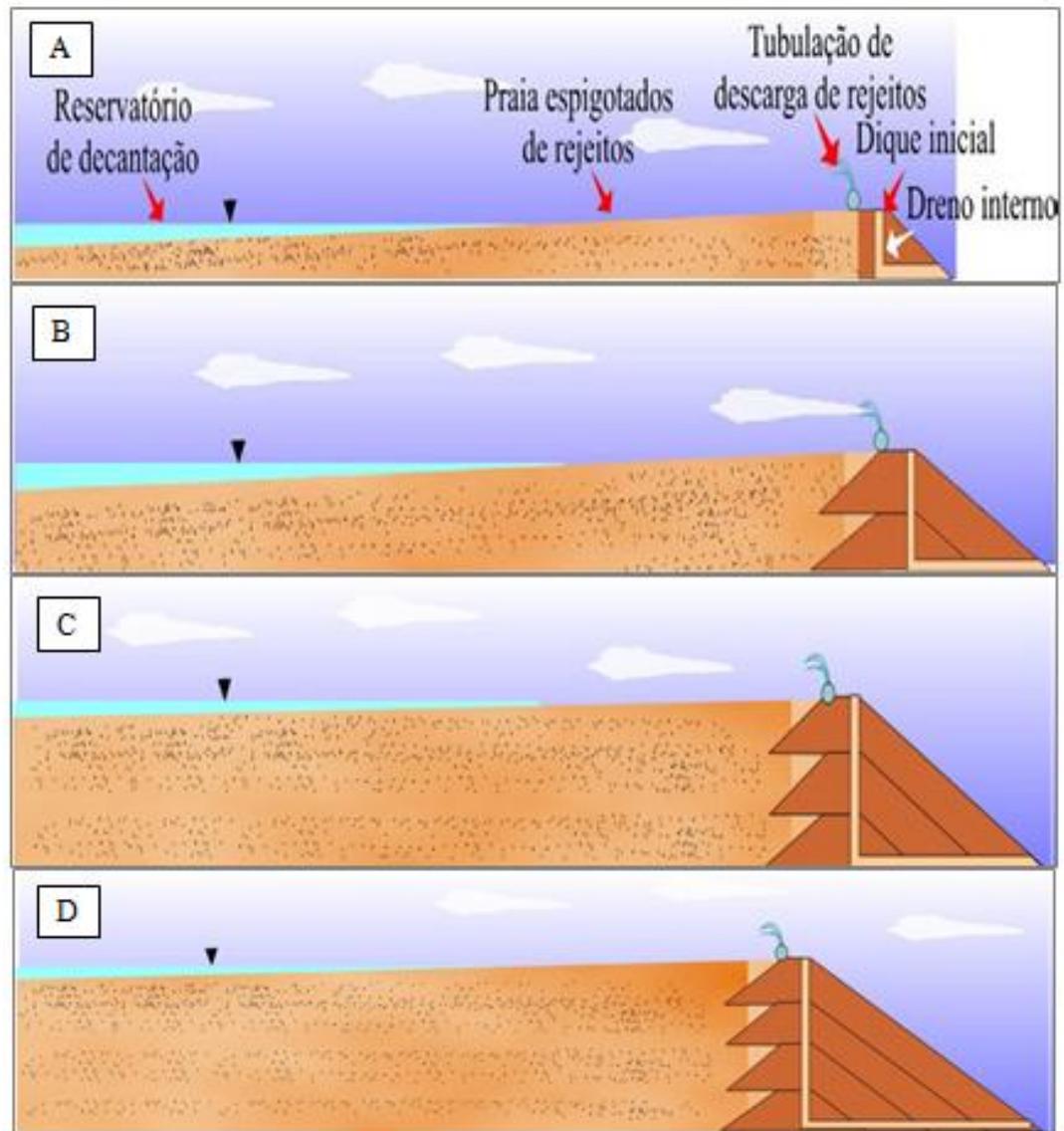
Fonte: Soares (2010).

2.10.3 Método da linha de centro

Trata-se de um método intermediário entre o método da linha de montante e o de linha de jusante, inclusive em termos de custo. O comportamento estrutural das barragens construídas por este método aproxima-se mais ao método de jusante.

Inicialmente é construído um dique de partida (dique inicial), e os rejeitos são lançados perifericamente a montante do mesmo, formando uma praia. O alteamento subsequente é realizado lançando-se os rejeitos sobre a praia anteriormente formada e sobre o talude de jusante do dique de partida. Neste processo, o eixo da crista do dique inicial e dos diques resultantes dos sucessivos alteamentos são coincidentes. Na Figura 2.14, ilustra-se a sequência construtiva deste método.

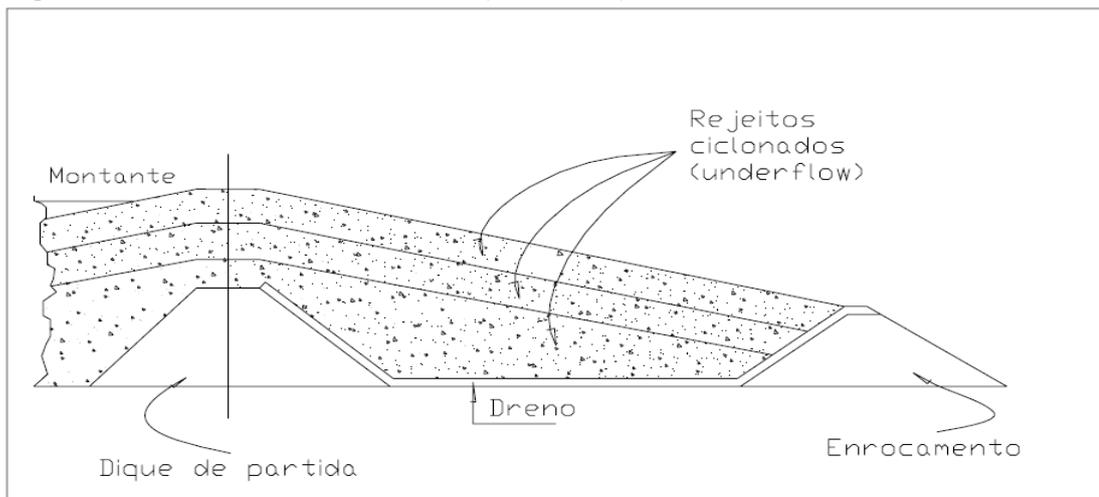
Figura 2.14: Método da linha de centro.



Fonte: Soares (2010).

Outra alternativa de estrutura do método da linha de centro, chamado assim porque o eixo da barragem é mantido na mesma posição enquanto ela é elevada, é uma solução intermediária entre o método de montante e o de jusante (inclusive em termos de custo), embora seu comportamento estrutural se aproxime do método da jusante. Na Figura 2.15 se apresenta o método da linha do centro. Inicialmente é construído um dique de partida e o rejeito é lançado perifericamente da crista do dique até formar uma praia. O alteamento subsequente é formado lançando materiais de empréstimo, estéril da mina ou “underflow” de ciclones, sobre o limite da praia anterior e no talude de jusante do maciço de partida, mantendo o eixo coincidente com o eixo do dique de partida.

Figura 2.15: Método da linha de centro (modificado).



Fonte: Nieble (1976).

Teoricamente, esse método procura reunir as vantagens dos dois métodos anteriores, além de buscar minimizar as desvantagens.

No Quadro 2.5, sintetizam-se os métodos construtivos descritos, abordando suas características gerais, vantagens e desvantagens. No Quadro 2.6, estão sumarizadas as principais características e aspectos de segurança das obras construídas, segundo diferentes métodos, comparadas às barragens de terra compactada.

Quadro 2.5: Métodos construtivos de barragens de contenção de rejeitos.

Características Gerais:

- Método de Montante: é o mais antigo e o mais empregado na atualidade. Lançamento a partir da crista por *spigots* (as frações grossas se depositam junto ao corpo da barragem). Também podem ser usados hidrociclones.
- Método de Jusante: construção de dique inicial impermeável e barragem de pé. Separação dos rejeitos na crista do dique por meio de hidrociclones. Barragem com dreno interno e impermeabilização a montante.
- Método de Linha de Centro: variação do método de jusante.

Vantagens:

- Método de Montante: menor custo e maior velocidade de alteamento.
- Método de Jusante: maior segurança. Comparação de todo o corpo da barragem.
- Método de Linha de Centro: variação do volume de *underflow* em relação ao método a jusante.

Desvantagens:

- Método de Montante: maior probabilidade de instabilidade em virtude da existência de finos não adensados: próximo ao corpo da barragem. Baixa compactidade do material. Possibilidade de liquefação.
- Método de Jusante: necessidade de grandes quantidades de *underflow* (problemas nas primeiras etapas). Deslocamento do talude de jusante (proteção superficial só no final da construção).
- Método de Linha de Centro: pode ser necessário estender os trabalhos de compactação a montante do eixo da barragem.

Fonte: Espósito (2000).

Quadro 2.6: Comparação entre as principais características de barragens de contenção de rejeitos em função dos métodos construtivos.

	Convencional	Montante	Jusante	Linha de Centro
Tipo de Rejeito Recomendado	Qualquer tipo.	Mais de 40% de areia. Baixa densidade de polpa para promover segregação.	Qualquer tipo	Areias ou lamas de baixa plasticidade
Armazenamento d'Água	Boa	Não recomendado para grandes volumes.	Boa	Não recomendado para armazenamento permanente.
Resistência Sísmica	Boa	Pobre em áreas de alta sismicidade	Boa	Aceitável.
Restrições de Alçamento	De uma só vez, ou em poucas etapas.	Recomendável menos de 5 a 10m/ano	Nenhuma	Pouca
Requisitos de Alçamento	Materiais naturais e/ou estéril.	Solo natural. Rejeitos ou estéril.	Rejeitos ou estéril.	Rejeitos ou estéril.
Custo Relativo do Corpo do Aterro.	Alto ($3V_m$)	Baixo V_m^*	Alto ($3V_m$)	Moderado ($2V_m$)

Fonte: Nielbe (1986, modificado).

V_m^* = volume da barragem pelo método de montante.

2.11 CONCEPÇÃO DE PROJETO E METODOLOGIAS DE DISPOSIÇÃO DE PILHAS DE ESTÉRIL

2.11.1 Aspectos gerais de pilhas de estéril

Neste bloco são apontados os principais critérios de projeto de pilhas de estéril de cunho geral, sem quaisquer referências a empresas do ramo minerador, além das metodologias comumente utilizadas para disposição destes materiais, buscando-se estabelecer uma padronização das técnicas aplicadas e verificar sua aplicação no semiárido nordestino.

De uma maneira geral, os estéreis ferríferos constituem comumente os materiais de decapeamento da jazida, escavados e removidos de forma a permitir o acesso aos corpos de minério. Os materiais constituintes são representados por solos e rochas de naturezas diversas, com diferentes granulometrias, que são

transportados por equipamentos transportadores e estocados sob a forma de pilhas em sucessivos alteamentos. Uma vez que o lançamento e a disposição final dos materiais escavados ocorrem segundo a seqüência errática da liberação das novas frentes de lavra, uma pilha de estéril constitui, por princípio, uma estrutura extremamente heterogênea e naturalmente complexa (GOMES, 2004).

As etapas de planejar, construir e operar pilhas de estéril são conseqüências naturais de uma empresa de mineração. As pilhas de estéril constituem uma das maiores estruturas geotécnicas feitas pelos homens, sendo de fundamental importância seu planejamento. Os custos associados a essas estruturas normalmente representam parcela significativa nos gastos de uma mina. Tais estruturas são operadas cada vez com maiores dimensões exigindo, conseqüentemente, maiores demandas de espaço e a adoção de critérios seguros de projeto. Nos itens seguintes, são apresentadas as etapas fundamentais para uma correta disposição em pilhas dos estéreis gerados em uma planta de mineração.

2.11.2 Fase de planejamento

Portanto, é importante realizar estudos e acompanhar a construção de uma pilha de estéril, com a finalidade de se evitar problemas técnicos e econômicos no empreendimento da mineração como um todo. Cada local e cada estrutura de disposição de estéreis são singulares e condições específicas podem ditar um número significativo de investigações geotécnicas e condicionantes de projeto (ARAGÃO, 2008).

A fase de exploração de uma mina constitui a etapa de coleta de grande parte dos dados e informações utilizadas na concepção de um projeto de pilha de estéril. A fase de previabilidade representa a etapa de aquisição de informações específicas sobre os locais prováveis para a disposição do estéril, com base em um reconhecimento preliminar das áreas pré-selecionadas e coleta de dados relativos aos condicionantes locais em termos de geologia, topografia, vegetação, hidrologia, sismicidade natural e induzida, segurança, clima e potenciais registros arqueológicos, além de projetos similares e publicações técnicas diversas, incluindo-se ainda fotos aéreas, mapas geológicos e relatórios de dados pluviométricos (WELSH, 1985).

O princípio geral da escolha do local de implantação da pilha é governado pela distância de transporte requerida para os estéreis, o que direciona a localização

das pilhas em áreas próximas às frentes de lavra, no contexto do próprio domínio geral do empreendimento.

A seleção do local para a construção de uma pilha de estéril envolve algumas considerações de ordem econômica, técnica e ambiental. Esses fatores devem ser primeiramente analisados em separado, e em seguida avaliados em conjunto, a fim de se determinar um local, no qual os objetivos econômicos e técnicos sejam maximizados e os impactos ambientais minimizados. Por outro lado, esses fatores são inter-relacionados, a importância de um depende fundamentalmente do nível de estudo adotado na avaliação dos demais (BOHNET, 1985).

A escolha do local mais adequado é, então, condicionada pela avaliação conjunta e integrada dos dados em inspeções de campo, levantamentos topográficos e quaisquer outros dados técnicos disponíveis. Ambientalmente, duas questões devem ser consideradas, a primeira trata-se de um estudo prévio das áreas disponíveis para disposição do estéril, conhecendo-se os locais pré-selecionados e verificando a destinação destas áreas sob o aspecto ambiental. A segunda refere-se à descrição e classificação dos possíveis impactos ambientais, causados pela pilha de estéril. O local escolhido deverá ser aquele no qual incorrem impactos ambientais mínimos.

Em outros casos, condicionantes específicos restringem a escolha de um dado local de disposição, como por exemplo, áreas afastadas ou localizadas em cotas muito mais elevadas que as correspondentes às frentes de lavra; inserção da pilha no domínio de amplas bacias de drenagem, induzindo o barramento de elevadas vazões afluentes; condições de fundação tipificadas por solos de baixa resistência, demandando a remoção de grandes volumes de materiais ou a adoção de taludes muito suavizados com conseqüente redução da capacidade de armazenamento da pilha; ocupação de espaços nobres ou passíveis de proteção ambiental ou cultural (solos férteis, matas nativas, ecossistemas, sítios arqueológicos etc.); áreas externas ao domínio do empreendimento (custos de desapropriações, licenciamentos específicos etc.).

Concluída as etapas de elaboração do planejamento e do projeto preliminar, a versão final deve ser encaminhada ao órgão ambiental responsável para concessão da licença. Caso algum problema seja identificado, a licença é suspensa até que todos os potenciais problemas detectados sejam adequadamente sanados. Uma vez superadas todas as fases inicialmente descritas, torna-se possível o desenvolvimento

do projeto executivo, em que são delineadas todas as características da pilha, compreendendo as suas disposições geométricas, dimensionamento do sistema de fundo e dos sistemas de drenagem interna e superficial, metodologias construtivas, proteção final das bermas e acabamento paisagístico (NBR 13029, 2006).

2.11.3 Investigação geotécnica dos materiais da fundação e da pilha

De maneira a caracterizar as feições presentes de maior relevância (mantos de intemperismo, afloramentos, presença de matacões, depósitos de tálus, nascentes etc.), impõe-se fazer previamente um levantamento geológico-geotécnico da área, buscando-se subsídios para os trabalhos subsequentes da investigação geotécnica.

As investigações geotécnicas possibilitam a elaboração de diferentes seções geológico geotécnicas da área de implantação da pilha que, analisadas em conjunto com os perfis individuais de sondagem, permitem também estabelecer o perfil geotécnico do terreno e a contextualização das unidades geológicas locais em relação à geologia regional. Como dado complementar de grande relevância, as sondagens permitem inferir a posição do NA no terreno.

2.11.4 Estudos hidrológicos e hidrogeológicos da área

Os estudos hidrológicos e hidráulicos objetivam a determinação das vazões afluentes e efluentes com base nas características da bacia hidrográfica e das chuvas intensas da região. Estes estudos permitem a aferição dos volumes de captação e condução dos dispositivos de drenagem superficial e interna, visando o adequado dimensionamento destas estruturas. Os parâmetros físicos da subbacia (área de drenagem, perímetro, altitudes limites, etc.) têm grande influência na estimativa das vazões efluentes e são normalmente extraídos de mapas topográficos, em escalas adequadas, propiciando a avaliação da forma da bacia, do sistema de drenagem, do perfil longitudinal do curso d'água e das características do relevo da bacia.

2.12 PROJETO EXECUTIVO DA PILHA

Um projeto pode ser conceitual, básico ou executivo. Um projeto conceitual é aquele que estabelece as linhas mestras da estrutura, abordando seus conceitos básicos sem foco com o dimensionamento da obra. O projeto básico constitui o pré-dimensionamento da estrutura e fornece os desenhos e as especificações necessárias para a contratação de empreiteiro para sua construção, ao passo que o projeto executivo apresenta o dimensionamento final da estrutura e fornece os desenhos detalhados para a sua construção. Os resultados destes estudos são apresentados comumente na forma de um relatório técnico final.

Na fase do Projeto Executivo de uma pilha de estéril, são desenvolvidas as análises correlacionadas diretamente à viabilização técnica da obra, compreendendo os seguintes estudos: Arranjo geométrico da pilha de estéril com maximização do volume; Dimensionamento e detalhamento do sistema de drenagem interna e superficial para a pilha; Análise de estabilidade da pilha de estéril; Projeto de instrumentação e monitoramento para a pilha de estéril; Planilha de Quantitativos e Elaboração do Relatório Final do Projeto (GOMES, 2004).

2.13 GEOMETRIA DA PILHA DE ESTÉRIL

Diversas alternativas de arranjos e geometrias para cada pilha de estéril são elaboradas de acordo com o mapeamento geológico-geotécnico da área, integrado à base cartográfica existente, juntamente com observações resultantes de visitas técnicas de campo, levando-se em consideração os limites naturais e os limites impostos pela infraestrutura existente. O arranjo final deve prever a configuração da pilha ao longo da área disponibilizada, considerando as restrições mencionadas e possibilitando o maior volume de armazenamento possível.

Como diretrizes de projeto, são pré-definidos os valores dos seguintes parâmetros relativos à concepção da geometria da pilha: Volume mínimo admissível; Altura das bancadas dos taludes; Largura mínima de berma; Largura mínima de crista e Raio mínimo de curvatura das faces.

Definidos os parâmetros de referência e a geometria final da pilha, são calculadas as correspondentes relações '**cotas x volumes**' de armazenamento dos estéreis, com base no levantamento topográfico da área de implantação selecionada.

2.14 ANÁLISE DA ESTABILIDADE DA PILHA DE ESTÉRIL

Um talude pode ser considerado como potencialmente instável a partir do momento em que as tensões cisalhantes originárias de esforços instabilizadores sejam ou possam vir a serem maiores que as resistências ao cisalhamento disponíveis ao longo de uma zona do maciço capaz de mobilizar um mecanismo potencial de ruptura. Uma análise de estabilidade consiste em determinar, quantitativamente, um índice ou uma grandeza que sirva de base para uma melhor compreensão do comportamento e da sensibilidade à ruptura de um talude ou encosta, devido aos agentes condicionantes (poropressões, sobrecargas, geometria, sismos naturais e induzidos etc.).

Portanto, o objetivo da análise de estabilidade é avaliar a possibilidade de ocorrência de potenciais movimentos de massa ao longo de taludes naturais ou construídos. A análise de estabilidade tem grande magnitude de aplicações em obras geotécnicas. São necessários estudos considerando diversos momentos da obra, do final de construção a condições de longo prazo. A estabilidade global é apenas um dos estados limites que devem ser considerados, devendo ser investigados também a possibilidade de erosão superficial, erosão interna (*piping*), deformações excessivas e capacidade de carga da fundação.

As rupturas que podem ocorrer comumente num maciço de estéril são do tipo circular, não circular translacional e composta. A ruptura não-circular ocorre em materiais não homogêneos, ruptura circular ocorre em materiais homogêneos e isotrópicos; e a ruptura translacional e composta é condicionada pelas especificidades de certas condições de contorno. As pilhas de estéril geralmente são analisadas utilizando a condição de ruptura não-circular, pois esta hipótese é compatível com a consideração de um maciço constituído por materiais diversos e associados segundo padrões aleatórios e descontínuos.

2.15 PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO DE PILHA DE ESTÉRIL

A instrumentação constitui uma importante ferramenta no acompanhamento e aferição do comportamento de grandes estruturas geotécnicas, implicando a instalação de medidores específicos, a aquisição controlada dos registros e a

avaliação sistemática e contínua dos dados coletados. Para a avaliação do comportamento de uma pilha de estéril, são instalados diversos instrumentos ao longo de uma dada seção representativa do empilhamento. Esta instrumentação é composta geralmente por medidores de NA, piezômetros e marcos superficial, visando à definição da posição do NA, a medida de poro pressões e de deslocamentos, respectivamente.

Marcos superficial tem como objetivo detectar os deslocamentos superficiais, que podem ser de dois tipos: os verticais e os horizontais. Para determinar esses movimentos são instalados no mínimo três marcos fixo, ou seja, que não estarão sujeitos à influência das obras em questão, em locais estabelecidos que permitam fácil visualização destes. Os marcos superficiais são constituídos de um bloco de concreto, barra de aço galvanizada enterrada no maciço e um pino de aço inox no topo para servir de apoio para as régua de nivelamento.

Os deslocamentos verticais são medidos por nivelamento geométrico, e a precisão, obviamente relacionada com a metodologia utilizada, deve situar-se na casa dos décimos de milímetro. A observação dos deslocamentos horizontais se faz por triangulação, e a precisão das leituras, função do tipo do teodolito ou estação total e do procedimento utilizado, é da ordem de milímetros. O nivelamento de ambos os deslocamentos são monitorados com auxílio dos marcos fixos.

2.16 METODOLOGIAS DE DISPOSIÇÃO DE PILHAS DE ESTÉRIL

Usualmente, as empresas não tinham preocupação na forma de lançamento final dos estéreis da mina, quase sempre relegados a depósitos de bota-foras sem nenhum controle operacional. As condições atuais impõem, ao contrário, que um sistema de disposição de estéril seja entendido como uma estrutura projetada e implantada para acumular materiais, em caráter temporário ou definitivo, que deve ser disposto de modo planejado e controlado para assegurar suas condições de estabilidade geotécnica e ser protegido contra ações erosivas e sísmicas.

Em pilhas de estéril, os principais custos de disposição estão concentrados nas seguintes atividades: drenagem, proteção vegetal, retenção de finos gerados por carreamento de sólidos durante e após a formação da pilha, manutenção ao longo dos anos e transporte do estéril. Dentre estas atividades, a mais impactante

refere-se às condições de transporte, estando estas diretamente dependentes dos equipamentos disponíveis e dos perfis de tráfego.

Basicamente, uma pilha de estéril pode ser construída pelos **métodos descendente ou ascendente**.

2.17 PILHA EXECUTADA PELO MÉTODO DESCENDENTE

São pilhas executadas sem nenhum controle geotécnico, em aterros de ponta tipo bota-fora, pelo lançamento e basculamento direto do estéril a partir da cota mais elevada dos taludes da pilha, construída já na sua altura máxima (Figura 2.16). Neste caso, as condições de fundação e os taludes do terreno natural na região do pé da pilha são os elementos que, em geral, condicionam a estabilidade da pilha.

As atividades de compactação são restritas ao tráfego dos equipamentos e os taludes evoluem com a dinâmica do empilhamento, não permitindo, assim, procedimentos de cobertura vegetal ou de proteção superficial dos taludes. Constituem estruturas bastante instáveis, altamente susceptíveis a erosões e a escorregamentos generalizados (Figura 2.17). Possuem, portanto, enormes restrições de aplicação prática, sendo indicadas apenas para materiais altamente drenantes (enrocamentos) ou em áreas confinadas.

Figura 2.16: Construção de uma pilha de estéril pelo método descendente.

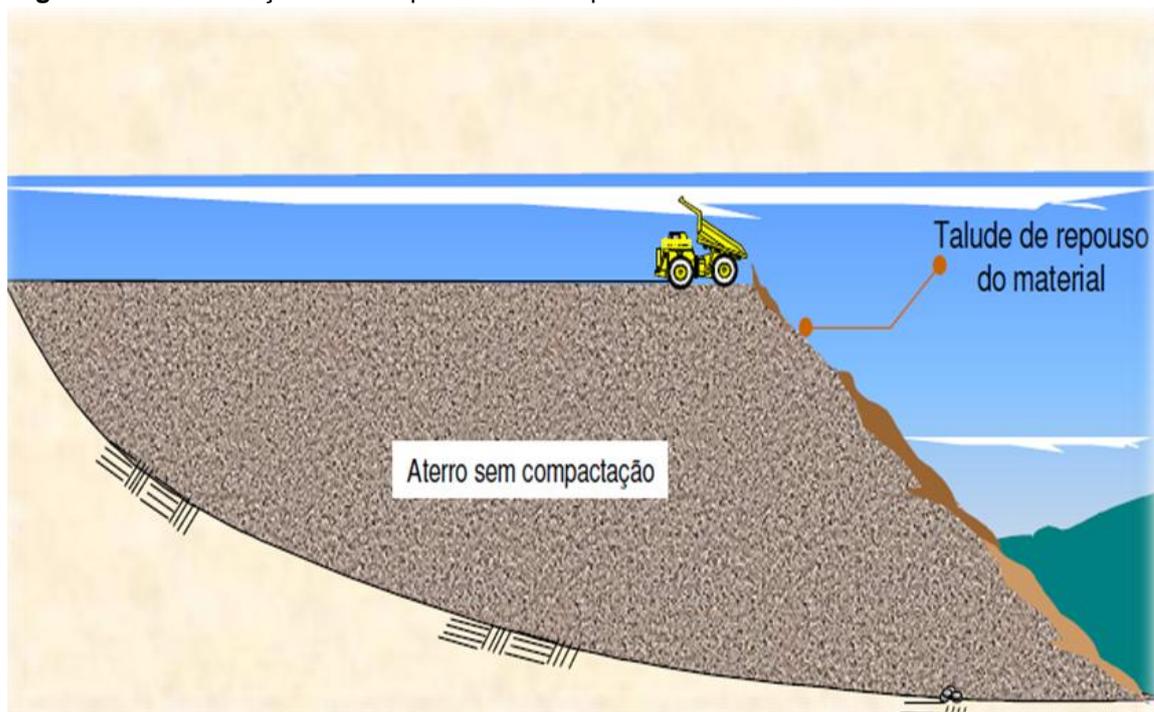


Figura 2.17: Ruptura de pilha de estéril de grande porte.



Fonte: Chammas (1986).

2.18 PILHA EXECUTADA PELO MÉTODO ASCENDENTE

A construção ascendente (Figura 2.18) constitui a metodologia mais adequada, uma vez que o comportamento geotécnico da estrutura pode ser bem acompanhado e controlado ao longo dos alteamentos sucessivos.

Figura 2.18: Construção de uma pilha de estéril pelo método ascendente.

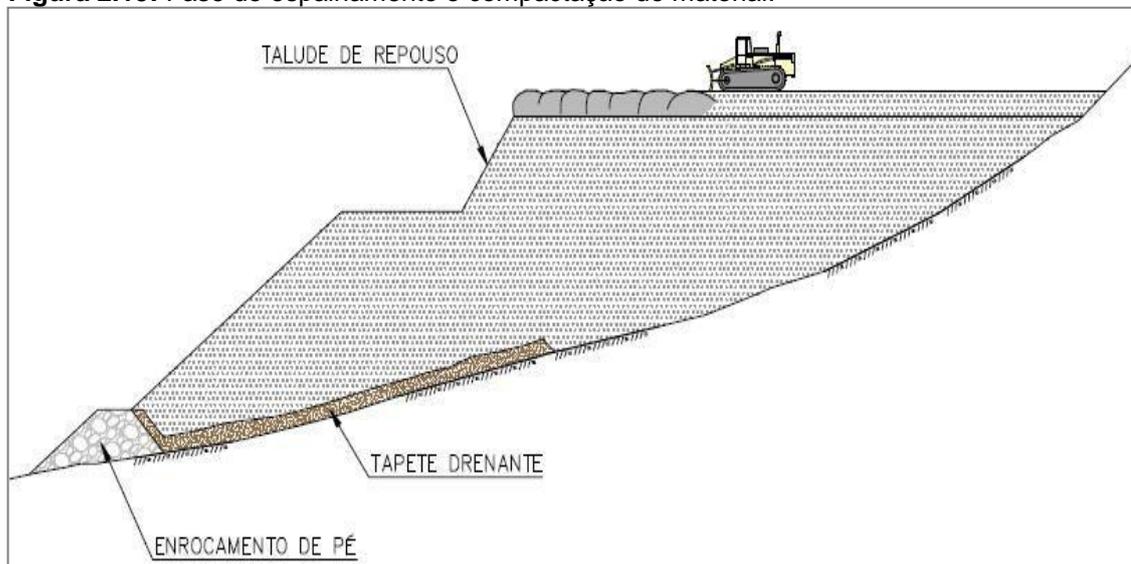


Fonte: CETEM (2010).

Resumidamente, a metodologia construtiva pode ser definida de acordo com as seguintes etapas:

1. Execução de jusante para montante, em direção às cabeceiras da bacia de drenagem, a partir de um enrocamento de pé;
2. O material é transportado por meio de caminhões ou *motoscrapers* e lançado sobre a plataforma de trabalho, de maneira a conformar pilhas de pequena altura (tipicamente entre 2,0 e 3,0m);
3. O espalhamento do material é feito por trator de esteira (camadas entre 1,0 e 1,5m de espessura), com compactação induzida pelo próprio tráfego dos veículos (Figura 2.19);
4. Formação de bancadas e bermas pelo método ascendente (entre 10,0 e 15,0m de altura) e retaludamento posterior com trator de esteira, sendo a camada superficial regularizada e estabilizada por compactação final;
5. Implantação de dispositivos de drenagem e de proteção superficial dos taludes concluídos.

Figura 2.19: Fase de espalhamento e compactação do material.



Fonte; CETEM (2010).

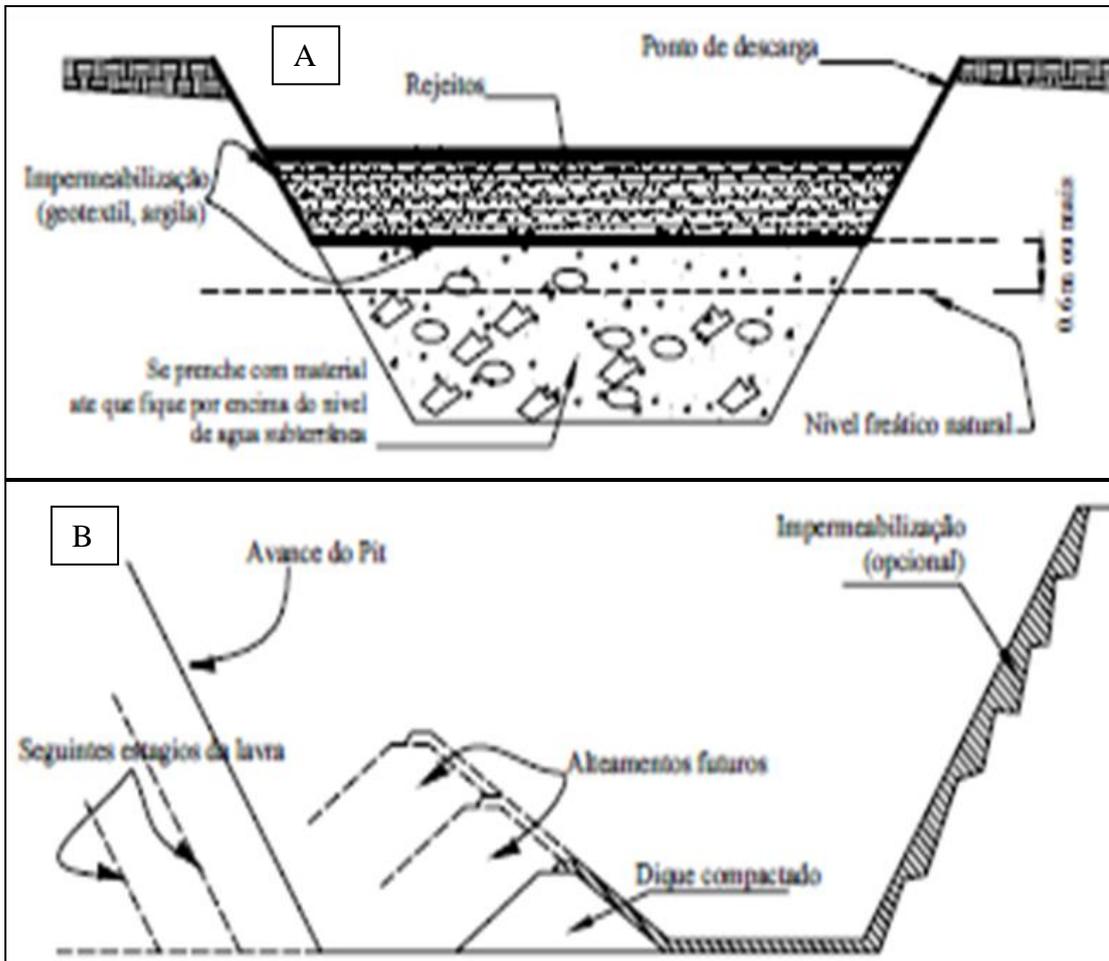
Este método apresenta uma grande contribuição à segurança da estrutura, uma vez que qualquer ruptura terá de passar pelo banco anterior, que também atua como apoio para o pé do talude do banco e fornece certo confinamento para os solos de fundação. Outro ponto positivo é que o pé de cada banco é suportado em uma superfície plana, ou seja, na berma superior (EATON *et al.*, 2005).

Com relação aos processos utilizados nas minas para remoção e disposição do estéril, estes tendem a gerar ambientes favoráveis para a predominância de sistemas heterogêneos de escoamento pelo maciço da pilha, devido à grande variabilidade das propriedades físicas dos estéreis. Tal fato pode ser reforçado, ainda mais, caso o método de deposição utilizado seja o método descendente.

2.19 DEPOSIÇÃO EM “PIT” (PROCESSOS DE EXTRAÇÃO DE MINÉRIO A CÉU ABERTO)

Este tipo de deposição é feito tipicamente em minas a céu aberto onde não é necessária a construção de diques. Na Figura 2.20 são apresentados os dois tipos de deposições, quando a extração do minério foi completa (a), e quando a deposição é feita ao mesmo tempo do que a extração de minério (b).

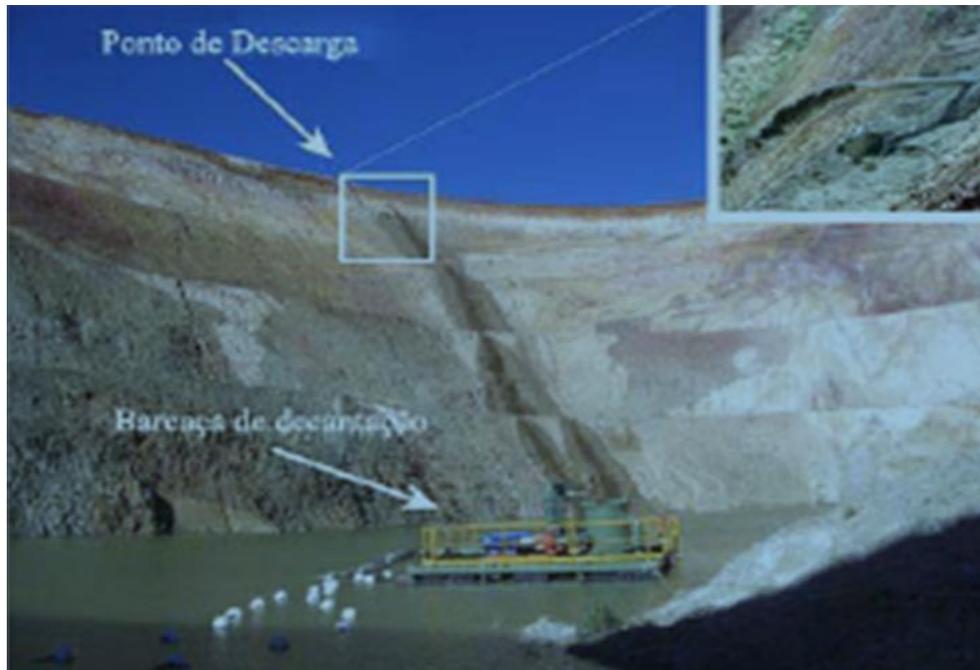
Figura 2.20: Deposição em “pit”: (a) Extração do minério total; (b) Deposição feita ao mesmo tempo do que extração do minério.



Fonte: Ritcey (1989, modificado).

A Figura 2.21 ilustra um caso de aplicação em uma mina em Minas Gerais.

Figura 2.21: Deposição em “pit”.



Fonte: Mina Samarco (2009).

Esse método de disposição, tipicamente, dispõe o material estéril dentro de uma cava exaurida de uma mina e dispensa a construção de diques e drenos de fundo, de acordo com Ritcey (1989).

Alguns fatores que devem ser observados a respeito da disposição de estéreis em cava são os seguintes, segundo Ritcey (1989):

- Como na disposição em mina subterrânea, menos material em relação ao que foi removido poderá ser colocado. A diferença em volume é em torno de 25%;
- O método é fácil de projetar e a execução da cobertura assegura erosão mínima e boa drenagem;
- Resulta em poluição mínima do ar;
- Esteticamente o método pode ser agradável;
- A lavra pode ser conduzida concomitante com a colocação do estéril. Usualmente uma pequena cava inicial é usada no estágio inicial da operação;
- Os altos e profundos taludes da cava, por estarem cobertos pelo estéril, têm a área total superficial a ser revegetada minimizada;
- Parâmetros hidrogeológicos considerando migração de contaminantes e infiltração são pobremente entendidos.

A disposição de estéreis em cava de mineração pode possibilitar um ganho estético e uma melhor reabilitação ambiental em termos de habitat potencial tanto para plantas como animais aquáticos e terrestres, isto em relação aos métodos convencionalmente adotados, de acordo com Mend (1997 *apud* KUYUCAK, 2001). Os tipos de estéreis incluem os resíduos de processos industriais e lixo urbano. Em adição, têm sido propostas aberturas de cavas com a finalidade de disposição de estéril de mina de urânio.

2.20 INTRODUÇÃO A TEORIA DE SISMOS

Um sismo é um fenômeno de propagação de vibrações bruscas e passageiras através da superfície da terra. Este fenômeno resulta de movimentos subterrâneos de placas rochosas, de atividade vulcânica ou por deslocamento de gases no interior da terra como, por exemplo, o metano. Este movimento está associado a uma rápida libertação de grandes quantidades de energia, sob a forma de ondas sísmicas. As ondas sísmicas deslocam-se para longe da fonte do sismo ao longo da superfície e através do interior da Terra, em várias velocidades dependendo dos materiais através dos quais estas se deslocam. O local onde o sismo é gerado designa-se de hipocentro ou foco e o ponto da superfície da Terra situado acima do foco designa-se de epicentro. A distância entre o foco e o epicentro chama-se de distância focal.

Quando ocorre um sismo, são produzidos vários tipos de ondas com diferentes frequências e com diferentes velocidades de propagação, que dependem das propriedades de composição da terra num determinado ponto.

2.20.1 Tipos de sismos

Os sismos dependendo da sua origem podem ser classificados como sismos de origem **natural ou induzidos**.

1) **Sismos de origem natural:** a maioria dos sismos está relacionada com a natureza tectônica da terra, sendo designados de sismos tectônicos. A força das placas é aplicada na Litosfera (inclui a crosta e a zona solidificada na parte mais externa do manto), que tem um deslizamento lento, mas constante sobre a Astenosfera (inclui a parte mais interior e viscosa do manto) devido às correntes

de convecção com origem no manto e no núcleo. O calor radioativo acumulado no interior da Terra, não sendo totalmente dissipado pelo vulcanismo, é suficiente para aquecer as camadas do manto e gerar correntes de convecção térmicas ascendentes, transportando as placas por arrastamento.

As placas podem afastar-se, colidir ou simplesmente deslizar uma sobre a outra. Com a aplicação destas forças, a rocha vai-se alterando até atingir o seu ponto de elasticidade, após o qual a matéria entra em ruptura e sofre uma libertação brusca de energia acumulada durante a deformação elástica. Esta energia é libertada sob a forma de ondas sísmicas que se propagam à superfície e no interior da terra. Aos sismos que ocorrem na fronteira de placas tectónicas dá-se o nome de sismos interplacas, sendo os mais frequentes, enquanto àqueles que ocorrem dentro da mesma placa litosférica dá-se o nome de sismos intraplacas e são menos frequentes. Também podem ocorrer sismos de origem vulcânica, devendo-se a movimentações de magma dentro da câmara magmática ou devida à pressão causada por este quando ascende à superfície, permitindo assim prever as erupções vulcânicas.

2) **Sismos induzidos:** este tipo de sismos está associado diretamente ou indiretamente à ação humana. Pode dever-se a várias razões, como extração de minerais, águas dos aquíferos ou de combustíveis fósseis, devido à pressão das águas nos leitos das barragens, grandes explosões ou a queda de grandes edifícios. Apesar de estas ações causarem vibrações na terra, não podem ser considerados sismos uma vez que geralmente dão origem a registos em sismogramas diferentes dos de terremotos de origem natural.

A associação dos sismos à construção de barragens e enchimento dos reservatórios começou a ser aventada em 1970, quando a UNESCO criou o Grupo de Trabalho dos Fenômenos Sísmicos Associados aos Grandes Reservatórios, concluindo que ao final da primeira reunião em dezembro daquele ano, que os reservatórios podem provocar sismos, independente da sismicidade da região, mas desde que as condições geotécnicas e hidrogeológicas do local favoreçam seu aparecimento (PALMIER, 1987). Segundo Shayani (1979), Lane (1971) foi o autor das primeiras publicações sobre o assunto, tendo observado que:

- A atividade sísmica resulta do enchimento do reservatório e não da construção da barragem;
- Num local onde já existia atividade sísmica, o número de tremores a sua magnitude aumenta com o aumento do NA;

– A atividade não se relaciona diretamente com o peso d'água armazenada, já que alguns grandes reservatórios não mostraram evidências de movimentos sísmicos;

– O nível de atividade sísmica de reservatórios em diferentes sítios não está diretamente relacionado com sua profundidade;

– A atividade sísmica pode ser iniciada quase simultaneamente com o enchimento do reservatório, porém o período de máxima atividade, em certos casos, mostra um apreciável retardamento em relação ao final do enchimento.

O primeiro caso bem documentado de sismos induzidos (FRANÇA, 1978 *apud* SHAYANI, 1979) ocorreu no reservatório da Barragem de Hoover, no rio Colorado, USA, pouco tempo depois do seu enchimento, em 1936. Dessa data até o início da década de 60, vários fenômenos semelhantes foram observados próximos a reservatórios ao redor do mundo, sem que resultasse qualquer dano de monta. Durante a década de 60, quatro terremotos de magnitude maior que 06 foram registrados junto a reservatórios recém-criados: Hsinfengkiang (China, 1962, magnitude 6,1), Kariba (fronteira Rodésia/Zâmbia, 1963, magnitude 6,1), Kremasta (Grécia, 1966, magnitude 6,3) e Koyna (Índia, 1967, magnitude 6,5).

Esses sismos causaram perdas humanas e materiais na área dos reservatórios e danos às próprias barragens no caso de Koyna e Hsinfengkiang, que, apesar de não serem catastróficos, despertaram a atenção de sismólogos e engenheiros projetistas de barragens.

2.20.2 O processo de ocorrência de sismos induzidos

Um sismo ocorre mediante um deslizamento ou fraturamento na crosta terrestre, em função de um acréscimo de tensão ou de um decréscimo de resistência. O aumento de tensão pode ser devido a diversos fatores, como forças tectônicas, expansão da rocha, cargas produzidas pelas marés e carregamentos e descarregamentos artificiais, devidos à mineração, construção de túneis e enchimento de reservatórios. O decréscimo de resistência da rocha é devido à mudança nas tensões efetivas, intemperismos ou alteração geológica do material.

A ruptura por cisalhamento do maciço rochoso ocorre quando sua resistência ao cisalhamento é atingida, estando diretamente relacionada com a razão: tensão de cisalhamento/tensão normal efetiva, no plano de ruptura do maciço. No caso de um

acréscimo de pressão neutra, a tensão de cisalhamento não se altera, porém a tensão normal efetiva sofre um decréscimo equivalente, criando-se, portanto, a possibilidade de ocorrência de ruptura num maciço rochoso. Este mecanismo tem sido considerado, pelos estudiosos do assunto, como um dos principais fatores de indução de abalos sísmicos pelo enchimento de reservatórios (SHAYANI, 1979).

Além do acréscimo na pressão neutra, outros mecanismos têm sido apontados como indutores de sismos, tais como: energia potencial armazenada pela depressão elástica da crosta, em pontos onde as tensões já são consideráveis, reajustamento das camadas do subsolo devido à sobrecarga do reservatório etc. No entanto, há um consenso de que os sismos induzidos ocorreram em maciços rochosos que já se encontravam com tensões próximas às de ruptura, mesmo antes do enchimento dos reservatórios, visto que as tensões causadas pelo enchimento foram pequenas quando comparadas com as tensões liberadas pelos sismos.

O que se tem de concreto é que um grande reservatório pode alterar o nível de atividade sísmica de uma área e que alguns sismos catastróficos ocorreram em áreas consideradas assísmicas antes do enchimento do reservatório.

2.20.3 Atividade sísmica induzida por reservatórios

Em 1964 o reservatório, cujo início de enchimento se deu em 1962, alcançou o volume de 2.000 Mm³. Havia ocorrido alguns tremores em 1963, mas até agosto de 1967 a atividade sísmica foi mínima. Porém, em setembro de 1967, cerca de 5 anos após o enchimento do reservatório, ocorreram dois fortes tremores, sendo que o primeiro deles provocou a morte de 177 pessoas e o ferimento de outras 2.300, destruindo grande parte da Vila de Koyna Naga (ROTHÉ, 1970 *apud* PALMIER, 1987).

Seguiram-se grandes tremores perto da barragem, um deles com magnitude de 5,4 em 1967, sendo que o evento de 10 de dezembro de 1967 registrou a magnitude local 6,5, um recorde mundial entre os sismos induzidos por reservatórios e também entre os eventos sísmicos históricos do oeste da Índia. Após esse acontecimento, vários pesquisadores acorreram ao local, para investigar as fissuras no solo e outras consequências geológicas associadas ao terremoto. As fraturas e fissuras no solo eram os aspectos de maior interesse, pois representavam a possível superfície de ruptura durante o terremoto, ao longo de uma zona de falha existente, além de permitir avaliar se a falha era ativa antes de 1967.

As fraturas ocorreram cerca de 4 km a sudeste da barragem e se estenderam por 7 a 8 km. A conclusão do estudo (PACKER *et al*, 1979) foi que a ruptura do solo ocorreu ao longo de uma falha ativa, que apresentara deslocamentos anteriores.

O lago Mead foi formado pela construção da barragem Hoover no rio Colorado, divisa dos estados de Arizona e Nevada, nos EUA. É um dos maiores e mais profundos reservatórios a que se atribui a responsabilidade por induzir ou deflagrar um aumento nos níveis de sismicidade local. A profundidade máxima do reservatório é de 166 m. A região era considerada de baixa sismicidade antes do enchimento do reservatório, entre 1935 e 1938. A atividade sísmica se iniciou após o fechamento da barragem e ficou concentrada numa faixa de 25 km de largura. Durante o período de monitoramento de 08 anos, que se iniciou em 1937, os epicentros se localizaram principalmente ao longo de falhas existentes, com profundidade dos focos inferior a 9 km. Os maiores tremores, com magnitude 5, ocorreram em 1939, 1942, 1948, 1952 e 1958 (PACKER *et al*, 1979).

Na fase inicial, entre os anos de 1938 e 1948/1949, os estudos dos tremores mostraram uma correlação entre as variações sazonais do NA do reservatório e a frequência da atividade sísmica. Contudo, a atividade sísmica no período subsequente, de 1949 a 1976, não mostrou correlação com um acréscimo de 20 % na carga do reservatório. Análises dos dados da área durante os anos de 1972 e 1973 mostraram que a atividade sísmica do reservatório não diferia daquela do seu entorno. Uma das explicações para o fenômeno é que a sismicidade pós-enchimento podia ser o resultado das tensões geradas pelo peso do lago, que provocou tremores ao longo das falhas preexistentes. A base para essa explicação é que a bacia na qual o lago foi formado assentou 18 a 20 cm e que o intervalo de tempo entre o reservatório alcançar o NA máximo (1938) e o maior evento registrado (o primeiro em 1939) foi relativamente curto.

Os principais casos de sismicidade induzida registrados no Brasil foram os de Orós (Ceará) e Carmo do Cajurú, sendo que no primeiro não houve registro. Os casos que foram melhor instrumentados (SHAYANI, 1979) são:

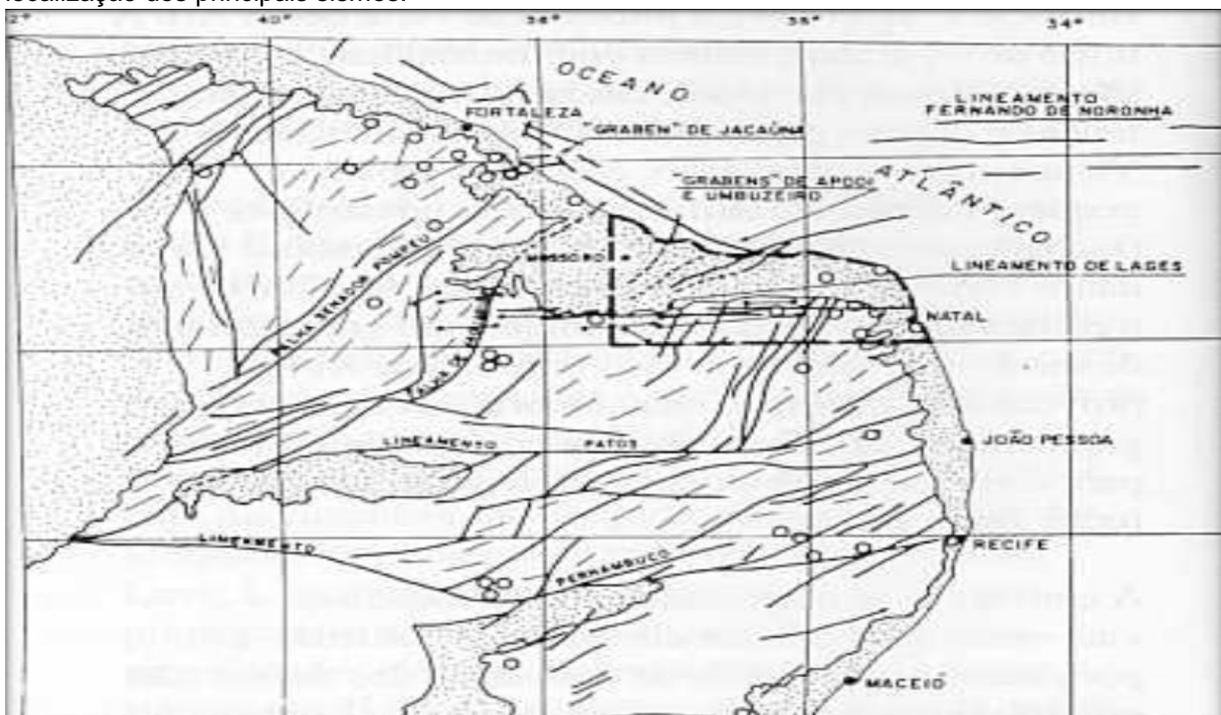
- Reservatório Carmo do Cajurú: situa-se no rio Pará, próximo à cidade de Carmo do Cajurú, em Minas Gerais. A barragem tem 23m de altura e o reservatório armazena 190 milhões de m³ de água. Concluído em 1959, teve registro de atividade sísmica a partir de abril de 1970, com sismo de maior magnitude 4,7 ocorrido em janeiro de 1972.

– A Sismicidade do Nordeste: a atividade sísmica no Nordeste Oriental e nas demais regiões brasileiras, até recentemente, era considerada de nível desprezível, em função da ausência de terremotos catastróficos no Brasil e de acordo com as considerações iniciais.

Os sismos que ocorrem no Brasil, parecem indicar profundidades focais rasas (33 km), localizando-se geralmente na crosta continental, acima da descontinuidade de Mohorovicic, caracterizando sismos de regiões intraplacas (BERROCAL *et al.*, 1984), embora faltem dados de determinações hipocentrais mais precisas.

A Região Sismotectônica do Nordeste, definida por este autor, abrange os Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Sergipe, sendo que a atividade sísmica está concentrada principalmente na porção norte do Ceará, na porção nordeste do Rio Grande do Norte e ao longo do Lineamento Pernambuco. Observa-se, entretanto, que a maioria deles concentra-se no norte do Rio Grande do Norte e Ceará, claramente próximo aos limites ou no interior da Bacia Potiguar (Figura 2.22).

Figura 2.22: Principais falhamentos e lineamentos da Região de Dobramentos Nordeste, com localização dos principais sismos.



Fonte: Extraído e modificado de Santos *et al.* (1984) e Assumpção (1986).

As primeiras informações sobre abalos sísmicos no Nordeste Oriental datam de 1808. Relacionam-se a um sismo que ocorreu na região de Açú-RN, com provável

epicentro em Apodi/RN, atingindo $m_b = 4,8$, abalo este, sentido nas cidades de Mossoró, Portalegre e Martins no Rio Grande do Norte e em Icó, Pereiro, Aracati e Fortaleza no Ceará segundo dados de Capanema, 1859 (BERROCAL *et al.*, 1984). O maior deles foi registrado em Pacajus/CE, em 1980, com magnitude $m_b = 5,2$.

Os sismos mais significativos desta região com magnitude m_b 4,0 são: 1968 – Pereiro/CE e Serra dos Macacos/RN, $m_b = 4,6$; 1973 – Parazinho/RN, $m_b = 4,3$; 1986 – João Câmara/RN, $m_b = 5,1$ e 1988 – Palhano/CE, $m_b = 4,5$ (ver Quadro 2.7).

Quadro 2.7: Resumo de terremotos históricos no Nordeste do Brasil.

DATE			COORDINATES		LOCALITY	INTENSITY (MMI)*	MAGNITUDE (mb)	COMMENTS
Y	M	D	LAT. S	LONG. W				
1808	08	08	05.70	37.70	Açu, RN	VI	4.8	
1811	10	28	08.08	34.87	Recife, PE	V		
1824			08.00	39.00		VIII	6.3 MI**	
1854	01	10	05.20	35.46	Touros, RN	V - VI		
1879	07	24	05.77	35.21	Natal, RN	V	3.3	
1903	02		04.38	38.97	Baturité, CE	VI		5 events in one week
1905 ?	07	18	10.20	40.40	S. do Bonfim, BA	V	4.8	
1905			11.20	42.30	Xique-Xique, BA	IV	4.7	
1919	11	24	03.87	38.92	Maranguape, CE	IV	4.5	
1928	04	14	04.56	37.76	Aracati, CE	VI	4.0	
1949	12	31	05.69	36.24	Lajes, RN	VI		
1963	08	27	05.69	36.24	Lajes, RN	V-VI		5 events Jan-Mar 3 events
	10	02	05.69	36.24	Lajes, RN	VI		
1964	01	19	08.28	35.96	Caruaru, PE	V		
	06	16	08.28	35.96	Caruaru, PE	V		
1967	01	21	08.20	35.98	Caruaru, PE	V	3.9	
1968			06.09	38.44	Pereiro, CE	V - VII	3.9 - 4.5	
1970	01		07.96	36.21	S. C. Capibaribe, PE	VI		
	11		06.93	35.53	Alagoinha, PB	VI		
1971	08	04	08.04	34.90	Recife, PE	V	3.0	
1972	03	04	09.93	36.49	Junqueiro, AL	V	3.3	
1973	07		05.28	35.82	Parazinho, RN	VI - VII	4.0 - 4.4	2 events many events
1974	03		04.18	38.13	Beberibe, CE	V		
	10	20	07.99	36.06	Toritama, PE	V	3.7	
	12	15	03.67	39.24	S. L. do Curu, CE	VI	3.4	
1976	07	29	04.83	38.80	Ibaretama, CE	V		other events
1977	02	25	05.71	35.75	Riachuelo, RN	VI - VII	3.5	3 more events
1978	02	14	06.28	36.03	Sta. Cruz, RN	V	3.7	more events
1980	11	20	04.30	38.40	Pacajus, RN	VII	5.2	
1987			05.50	33.70	João Câmara, RN		5.1	many events (1986/88)

Notes: Events from 1808-1980 summarized from Berrocal and others (1984)
 1824 events from EPRI (1987) and Branner (1912, 1920)
 1987 João Câmara events are from Ferreira and others (1987b)
 * Modified Mercalli Intensity
 ** Intensity Magnitude (EPRI, 1987)

(Extraído de D. Ostenaar, 1988)

Fonte: Ostenaar (1988).

Ostenaar (1988), assinala que a ausência de terremotos com $m_b \sim 6 - 6,5$ em todo o Nordeste durante os últimos 180 anos de registros confiáveis, é no mínimo,

indicativo da recorrência de eventos desta ordem. Ele admite que a recorrência de eventos com $m_b = 5$ a 5,5 para a região que compreende o Rio Grande do Norte e Ceará (cerca de 200.000 km²) está entre 100 e 1.000 anos, e, para aqueles próximos de $m_b = 5$ não mais que algumas dezenas de anos.

2.20.4 Objetivos básicos da instrumentação de barragens de rejeitos do ponto de vista sísmico

A Sismicidade Induzida por Reservatórios, também referenciada pela sigla SIR, manifesta-se em locais onde os lagos foram formados sobre um substrato rochoso que se encontra próximo ao estado de ruptura em razão da ocorrência de falhamentos. Essa condição próxima da ruptura pode ser alterada pela formação do reservatório, em razão do peso adicional da água represada, do aumento da pressão intersticial e do alívio de esforço causado pela percolação de água através das fraturas das rochas.

Considerando que os sismos induzidos por reservatórios no Brasil, de maneira geral, não ultrapassam os valores da sismicidade natural, o monitoramento contínuo com estações locais, abrangendo um longo período antes do enchimento do reservatório, poderá esclarecer aspectos importantes da sismicidade natural e contribuir para o prognóstico sobre a ocorrência de sismicidade induzida na área do empreendimento.

O monitoramento sismológico a ser executado na zona de influencia das barragens de rejeitos tem por objetivo avaliar a atividade sísmica induzida pelo reservatório a ser formado pelo barramento.

Dessa forma, o monitoramento prevê o reconhecimento da atividade sísmica natural atual, por meio do registro e caracterização em período anterior ao enchimento, para comparação com o nível de atividade sísmica obtida durante e após esse evento. Essa comparação permitirá avaliar a eventual existência de impactos no nível de sismicidade devido ao enchimento do reservatório.

O monitoramento deverá registrar e caracterizar as ocorrências sísmicas naturais e aquelas induzidas pela formação da barragem de rejeitos, abrangendo o período anterior ao enchimento, o de enchimento e o de pós-enchimento. Para a execução desse monitoramento será instalada uma rede de monitoramento local composta por de estações triaxiais independentes, mas que formam uma rede.

Também serão utilizados os dados de estações regionais já existentes, obtidos junto a cadastros de instituições, universidades e empresas.

O monitoramento tem ainda, por objetivo associado, registrar os sismos gerados nas detonações que serão executadas na escavação da base da barragem e diferenciá-los dos sismos naturais que eventualmente ocorram antes da formação do reservatório. Contudo, ressalta-se que não é objetivo do programa o monitoramento de vibrações e ultra-lançamentos ocasionados nas detonações, estando essa atividade vinculada ao Programa Ambiental para Construção (PAC).

O desenvolvimento do Programa permitirá, ainda, obter a correlação entre os sismos e as feições geológicas e estruturais da área, determinar epicentros, intensidades, magnitudes, acelerações sísmicas e área de influência dos eventos.

O Programa de Monitoramento da Sismicidade visa a mitigar o impacto “Ocorrência de Sismicidade Induzida”, ocasionado pela nova situação a ser imposta pela construção do barramento com rejeitos.

A caracterização detalhada da sismicidade da área será feita por meio de uma complementação do levantamento de dados e interpretação dos mesmos para um raio de 300 km a 500 km a partir do eixo do barramento conforme efetuado contemplando os seguintes aspectos: Relação de todos os eventos sísmicos naturais e induzidos por reservatórios registrados ou sentidos dentro da área, com a data, coordenadas, localidade, estado, intensidade, magnitude, área afetada, distância do ponto de interesse; Obtenção de mapas de isossistas para eventos significativos, naturais e induzidos; Localização e características de estações sismográficas de interesse para a área; Obtenção de plantas de localização dos eventos, individualizando aqueles naturais e induzidos e Correlação com estruturas geológicas da área.

2.20.5 Objetivos básicos da instrumentação de barragens de rejeitos do ponto de vista hidrogeotécnico

O interesse crescente pela segurança de barragens tem levado, em um número apreciável de países, à implementação de normas e critérios específicos para o projeto, construção, observação, inspeção e acompanhamento da operação de barragens e outras obras da engenharia geotécnica. Neste contexto, o monitoramento hidráulico-mecânico de barragens através da instalação de um

adequado sistema de instrumentação desempenha um papel fundamental na avaliação do comportamento destas estruturas, tanto durante o período de construção quanto no regime de plena operação. Através da leitura de valores de cargas de pressão, dos deslocamentos, vazões e tensões desenvolvidas no corpo da barragem propriamente dita, ou no maciço de fundação, é possível comparar-se quantidades experimentalmente medidas com aquelas previstas pelo projeto (fase de construção) ou estimadas para uma operação segura da barragem, sujeita, durante sua vida útil, a várias mudanças de carregamento causadas por flutuação do nível do reservatório, oscilações de temperatura etc.

A década de 70 teve como uma de suas principais características as dificuldades para importação de instrumentos, o que resultou em grande incentivo ao desenvolvimento de instrumentos de procedência nacional. Nesta área, destacaram-se o Laboratório Central de Engenharia Civil da CESP, em Ilha Solteira, e a Divisão de Engenharia Civil do IPT, em São Paulo.

O Comitê Brasileiro de Grandes Barragens (1996) estabeleceu como objetivos básicos da instrumentação os seguintes tópicos, agrupados de acordo com a etapa de desenvolvimento da barragem: construção, primeiro enchimento e operação.

a) Período de construção:

– Alertar sobre a ocorrência de possíveis anomalias no comportamento da barragem como, por exemplo, condições térmicas que possam dar origem a fissuras em estruturas de concreto ou tensões de tração que possam causar fissuras transversais em aterros compactados;

– Possibilitar soluções menos conservadoras, permitindo economia significativa para a obra. As barragens de Água Vermelha (entre Minas Gerais e Goiás) e Corumbá I (Goiás) foram construídas, totalmente a primeira e parcialmente a segunda, sobre espessas camadas de solo residual cuja remoção implicaria em elevados custos construtivos. Ambos os casos foram acompanhados da instalação de um abrangente programa de instrumentação para verificar o comportamento das obras sob tais maciços de fundação;

– Fornecer informações, por retro análise dos dados de instrumentação, a respeito dos valores dos parâmetros dos materiais que constituem a barragem e sua fundação;

- Possibilitar revisões do projeto durante o período construtivo, decorrentes, por exemplo, de análises térmicas do concreto versus intervalos de lançamento ou do acompanhamento do comportamento dos taludes de escavação.

b) Período de enchimento:

- Alertar sobre a ocorrência de possíveis anomalias que possam colocar em risco a segurança da estrutura como, por exemplo, desenvolvimento de pressões neutras elevadas indicando possíveis problemas com o sistema de drenos;
- Possibilitar avaliação do desempenho estrutural, geotécnico e hidráulico da obra, em função das comparações entre grandezas medidas “*in-situ*” e aquelas previstas por modelos teóricos ou experimentais de análise;
- Verificar a adequação das simplificações introduzidas nas hipóteses de projeto. Através de retro análises com base nos dados de instrumentação é possível fazer-se uma análise dos modelos constitutivos selecionados para simular o comportamento dos materiais bem como verificar a eficiência da modelagem matemática e das técnicas numéricas empregadas para a sua solução.

c) Período de operação:

- Verificar se a barragem está apresentando um desempenho geral satisfatório, conforme previsto em projeto;
- Caracterizar o comportamento no tempo dos solos e/ou do maciço rochoso de fundação determinando o prazo necessário para a estabilização dos deslocamentos, tensões, sub-pressões, vazões etc.;
- Caracterizar o comportamento no tempo das estruturas da barragem, levando-se também em conta os efeitos das condições termo-ambientais.

2.20.5.1 Instrumentação e segurança de barragem

A segurança de uma barragem (rejeitos) está intimamente relacionada aos aspectos de projeto, construção, instrumentação/inspeção, operação e manutenção. A fase de projeto de uma barragem e de suas estruturas anexas é sem dúvida uma

das mais importantes, uma vez que um projeto bem concebido é fundamental para garantir uma obra tecnicamente segura, sem prescindir, obviamente, de uma operação e manutenção cuidadosas.

Durante a construção da barragem, o papel desempenhado pela equipe de fiscalização é de vital importância para assegurar que a mesma seja executada de acordo com as especificações de projeto, e também permitir a introdução de pequenas modificações ou adaptações em campo sempre que necessárias.

É claro que por melhores que tenham sido o projeto de uma barragem e a fiscalização de sua construção, só será possível exercer um eficiente controle das condições de segurança da barragem se a mesma estiver sendo adequadamente inspecionada e monitorada através de instrumentação apropriada, operada por equipe treinada.

Durante a vida útil da barragem, são necessárias obras periódicas de manutenção com a finalidade de preservar em bom estado as várias estruturas, assegurar superfícies hidráulicas satisfatórias e garantir a operacionalidade dos equipamentos eletromecânicos e dos instrumentos de auscultação. No caso de barragens de enrocamento, as obras de manutenção mais usuais são:

- Limpeza de canaletas de drenagem, de caixas de dissipação e poços de saída do sistema de drenagem interna;
- Conservação do *rip-rap* e dos gramados de proteção dos taludes;
- Tratamento das surgências d'água junto ao pé do talude de jusante;
- Tratamento de trincas na superfície dos taludes ou na crista da barragem;
- Recomposição do enrocamento de pé quando da ocorrência de erosões provocadas por condições extremas de operação do vertedouro;
- Limpeza e manutenção dos instrumentos de auscultação.

As lições aprendidas com as rupturas de barragens têm revelado que um longo período de operação normal não é jamais garantia de condições futuras de segurança, uma vez que tem havido casos de ruptura brusca após 10 e 20 anos de operação normal.

2.20.5.2 Instrumentação para barragens de rejeitos

Em alguns casos de obras de engenharia, principalmente aquelas de grande porte, existe a necessidade de se acompanhar a evolução do seu comportamento após a sua conclusão. Assim, nestes casos são instalados instrumentos apropriados para o acompanhamento, com leituras das informações mais relevantes no que se refere ao seu comportamento.

As técnicas de auscultação do comportamento de barragens incluem a seleção do tipo e a determinação da quantidade de instrumentos a serem utilizados, sua localização e instalação, a aquisição de dados, análise e a interpretação dos resultados. Esse conjunto de técnicas constitui o que se chama de instrumentação geotécnica, e tem sido objeto de grande interesse e desenvolvimento no Brasil nos últimos dez anos.

Segundo Dunnycliff (1988), a instrumentação geotécnica envolve a união das capacidades dos instrumentos de medida e das capacidades das pessoas. A prática da instrumentação não se restringe apenas à seleção de instrumentos, sendo na verdade um processo que começa com a definição do objetivo e termina com a análise rigorosa dos dados coletados. Cada passo neste processo é relevante para o sucesso do programa de instrumentação.

Dunnycliff (1988) classifica os instrumentos de medida em duas categorias, dependendo da finalidade:

a) Instrumentos usados para determinar as propriedades de solos e rochas *insitu*: medem parâmetros geotécnicos como resistência, compressibilidade e permeabilidade, sendo usados normalmente durante a fase de projeto das obras (ex.: piezocone, palheta, pressiômetro).

b) Instrumentos usados para monitorar o comportamento da obra durante construção/operação: podem envolver medidas de pressão da água subterrânea, tensão total, deformação e/ou carregamento aplicado (ex.: piezômetros, células de carga, extensômetros, inclinômetros).

A instrumentação de auscultação implantada em barragens de rejeitos tem por finalidade avaliar o real comportamento dos rejeitos quanto ao desenvolvimento de deformações e de pressões intersticiais, obter dados de deslocamento, tensão total, vazão, nível d'água e comparar estes dados obtidos através de leituras periódicas aos respectivos valores de controle, máximo e mínimo, especificados nos

critérios de projetos. Os relatórios dos programas de inspeção e instrumentação devem ser avaliados tecnicamente de modo a permitir a adoção de ações efetivas imediatas, se necessário.

Segundo Kanji e Filgueira (1990) é oportuno distinguir a “instrumentação” dos “testes ou ensaios de campo”, uma vez que ambos medem grandezas. Enquanto na instrumentação se observa e se medem os eventos conforme ocorrem, os testes ou ensaios correspondem à medição de eventos propositadamente provocados.

A instrumentação prevista em projeto deve ser instalada no momento adequado assim como observar a frequência estabelecida de leituras para permitir o acompanhamento e a compreensão dos fenômenos e mecanismos que fundamentam a decisão de instrumentar uma barragem (KANJI; FIGUEIRA, 1990). Segundo o Simpósio sobre Instrumentação de Barragens (1996), a instrumentação a ser instalada em barragens de rejeitos deve visar dois objetivos básicos de segurança: a segurança estrutural e a segurança ambiental. Para este controle são adequados os instrumentos apresentados no Quadro 2.8, considerando as necessidades do projeto.

Quadro 2.8: Medições a serem utilizadas para segurança estrutural e ambiental.

Segurança Estrutural		Segurança Ambiental
Fundação	Maciço	Altura piezométrica do regime de água subterrânea
Deslocamentos verticais	Deslocamentos verticais	Composição química da água subterrânea
Deslocamentos cisalhantes horizontais	Deslocamentos horizontais	
Subpressão	Pressões intersticiais (ou neutra)	
Vazão de infiltração	Pressão da terra	
Medida de materiais sólidos carreados	Vazão de infiltração	
	Medidas dos materiais sólidos carreados	
	Medida de alongamento ao longo de crista e berma	

A rotina de leituras dos equipamentos possibilitará o acompanhamento das variações das grandezas medidas pelos instrumentos em cada fase do empreendimento e a identificação e a análise de qualquer comportamento anômalo que venha a ocorrer adotando-se medidas corretivas aplicadas com rapidez que se fizerem necessárias para garantir os níveis normais de segurança na operação.

A frequência mínima de leitura deve ser baseada na experiência de outras barragens e recomendações do *International Commission on Large Dams* (1982). Essa frequência de leitura não deverá ser encarada como algo rígido e imutável, devendo ser intensificadas quando da observância de valores muito acima dos seus valores limites ou com tendências de crescimento acima do esperado.

Definido o tipo de instrumento necessário que será implantado para monitorar o comportamento das estruturas e fundação, faz-se necessário definir valores teóricos que, com base em estudos, modelos matemáticos e modelos físicos, possam servir como referência aos resultados obtidos pela instrumentação de campo.

O controle da instrumentação de auscultação deve priorizar os instrumentos que permitam a observação de deslocamentos, subpressão e vazões de percolação, uma vez que constituem, dentre os instrumentos de auscultação de barragens, aqueles com maior facilidade de instalação e interpretação e os mais indicados para o controle da segurança das estruturas.

Para que as leituras sejam confiáveis é necessário que os instrumentos tenham sido calibrados e instalados corretamente, e uma vez instalados, não venham sofrer quaisquer avarias que os prejudiquem.

Em uma data a ser determinada antes do período de início de operação, todos os instrumentos de auscultação deverão ser submetidos a uma rigorosa operação de inspeção e limpeza.

2.20.6 Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB)

O assunto de segurança de barragens vem sendo foco de atenção crescente o mundo todo, pela recorrência com que tem se manifestado o problema de rupturas e mau desempenho destas barragens.

O International Commission on Large Dams (ICOLD), o Mining Association of Canadá (MAC), o International Council on Mining and Metals (ICMM) e o Banco Mundial, dentre outros organismos, vêm empreendendo esforços para definir

procedimentos de gestão da segurança de barragens, principalmente barragens de rejeitos, com o objetivo de reduzir as ocorrências de acidentes em barragens deste tipo. No Brasil, o assunto é também objeto de preocupação, sendo a segurança das barragens de rejeito, objeto de regulamentação por parte de órgãos licenciadores.

Conforme estabelecido por estas normas, os proprietários de barragens de rejeitos têm a responsabilidade de promover as ações necessárias, como manutenção da segurança destas barragens, incluindo a avaliação periódica de segurança e a auditoria independente de segurança das barragens, feitos por profissionais especializados.

A nova lei sobre segurança de barragens (nº 12.334, de 20 de setembro de 2010) obriga os proprietários a implantarem um sistema de gestão de segurança.

São fundamentos da política: a segurança de uma barragem deve ser considerada nas suas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação e de usos futuros; a população deve ser informada e estimulada a participar, direta ou indiretamente, das ações preventivas e emergenciais; o empreendedor e o responsável legal pela segurança da barragem, cabendo-lhe o desenvolvimento de ações para garanti-la; a promoção de mecanismos de participação e controle social e, que a segurança de uma barragem influi diretamente na sua sustentabilidade e no alcance de seus potenciais efeitos sociais e ambientais.

São instrumentos da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB): o sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado; o Plano de Segurança de Barragem (PSB); o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB); o Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente (SINIMA); o Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental; o Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais e o Relatório de Segurança de Barragens.

CAPÍTULO III – ESTUDO DE CASO

3.1 LOCALIZAÇÃO DA MINA BONITO

A área foco deste trabalho refere-se ao processo DNPM cujos dados são:

- Processo DNPM nº 848.211/2003.
- Alvará de Pesquisa nº 2.399 de 17/03/2004, com área de 555,26ha.
- Portaria de Lavra para minério de ferro, nº 237, de 31/07/2006 com área de 425,44ha delimitada por um polígono que tem um vértice a 1.348m, no rumo verdadeiro de $53^{\circ}16'SE$, do ponto de Coordenadas Geográficas: Latitude $05^{\circ}51'31,1''S$ e Longitude $36^{\circ}59'29,2''W$ e os lados a partir desse vértice, com os seguintes comprimentos e rumos verdadeiros: 1.725,00m-E, 1.709,13m-S, 2.800,00m-W, 1.215,00m-N, 1075,00m-E, 494,13m-N.

Portanto a área atual total do processo DNPM 848.211/2003, onde está localizada a Mina do Bonito é de 425,44 ha (Portaria de Lavra) e a área efetiva atual explorada é de cerca de 100ha (Figura 3.1).

Figura 3.1: O estudo de caso consistirá na avaliação de locais para localização de barragens de rejeitos de beneficiamento de ferro a ser construída na mina Bonito no município de Jucurutu, no Seridó Potiguar.



Fonte: MHAG.

A Mina Bonito em Jucurutu encontra-se totalmente inserida na Bacia- 02, do rio Piranhas/Açu, ocupando uma superfície de 34.500,00km², correspondendo a 32,80 do território do Estado do Rio Grande do Norte. Importante salientar que esta bacia referenciada, tem uma parte de sua área abrangendo o Estado da Paraíba, fazendo parte do semiárido nordestino.

3.2 ACESSIBILIDADE

A área em estudo refere-se ao processo DNPM nº 848.211/2003, onde se localiza a Mina do Bonito e situa-se na porção oeste do município de Jucurutu, estado do Rio Grande do Norte. A sede do município de Jucurutu está distante 255 km da capital Natal.

O acesso partindo-se da cidade de Natal se dá pela rodovia BR 101 até a cidade de Parnamirim. De Parnamirim segue-se até Macaíba pela rodovia BR 226 até o trevo existente no final da Reta Tabajara, onde há duas opções:

1) Opção de Rota 01 (Figura 3.2): continuar pela BR 226, passando pelas cidades de Bom Jesus, Tangará, Santa Cruz, Currais Novos, São Vicente, Florânia até Jucurutu.

2) Opção de Rota 02 (Figura 3.3): seguir pela rodovia BR 304, passando pelas cidades de Santa Maria, Riachuelo, Caiçara do Rio dos Ventos, Lages, Fernando Pedrosa e Angicos. Depois de Angicos, percorrendo-se 24 km chega-se a um trevo no município de Itajá e tomando-se a esquerda segue-se para São Rafael e Jucurutu.

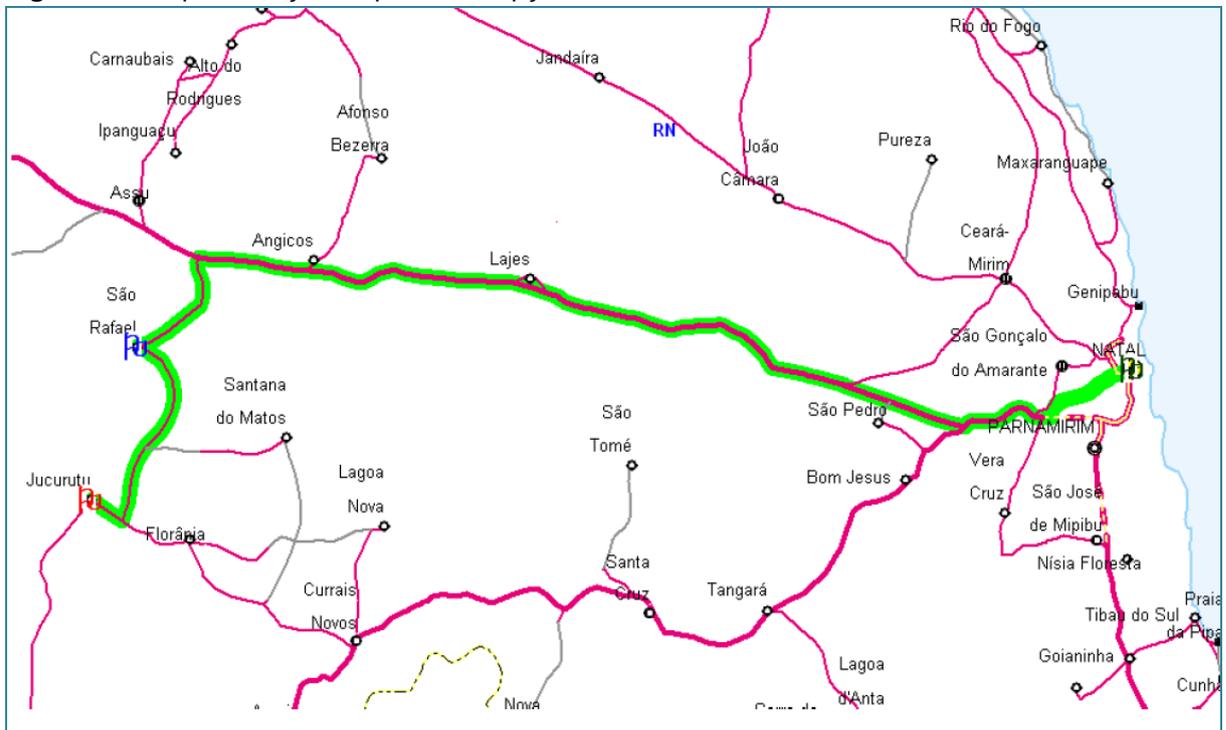
Nas duas opções citadas acima se chega até a sede do município de Jucurutu. Da sua sede percorre mais 12 km em direção norte para o município de Triunfo Potiguar, pela BR 226, passando pela Ponte do Rio Piranhas Assú e chegando a um trevo onde existe a placa MHAG Mineração – Mina do Bonito. Tomando o trevo à direita, percorre-se 17 km por uma estrada vicinal secundária e chega-se a Portaria da Mina do Bonito. A distância total da sede do município até a Mina do Bonito é de 30 km.

A distância total de Natal até a Mina do Bonito pela opção 01 é de 285 km e pela opção 02 é de 290 km.

Figura 3.2: Representação esquemática opção de rota 01.



Figura 3.3: Representação esquemática opção de rota 02.



3.3 HISTÓRICO

Durante o ano de 2004 a MHAG Mineração executou atividades de pesquisa mineral na Serra do Bonito e concluiu pela viabilidade de implantação de um projeto de minério de ferro, que se iniciou pelo minério do tipo magnetitito, de maior teor de Fe % e custo operacional mais baixo.

No ano de 2005 foi implantada toda a infraestrutura operacional necessária com a abertura da mina, implantação de uma unidade de britagem, pátio de transbordo rodoferroviário em Juazeirinho/PB e construção de um sistema de descarregamento de vagões e carregamento de navios com shiploaders, no Porto de Suape, localizado em Ipojuca/PE.

Com a implantação deste sistema de produção e logística rodoferroviária de minério de ferro, durante os anos de 2006 a 2008 a MHAG Mineração produziu cerca de 0,5 Mt de concentrados de minério de ferro dos tipos lump ore (granulado) e sinter feed (fino) e embarcou seis navios graneleiros do tipo panamax, sendo 01 (um) para a China e 05 (cinco) para o Bahrein.

A partir de 2008 foi definido o aproveitamento do itabirito, minério de ferro de baixo teor existente na Mina do Bonito, de maior quantidade e de custo operacional mais alto. Foram realizadas sondagens rotativas diamantadas, definição de rota de processo, recursos e reserva de minério de ferro para um projeto de produção de *pellet feed*.

A partir de 2010 até 2013 a MHAG Mineração fez novas caracterizações do itabirito, estudos logísticos, portuários, de engenharia de escopo do projeto de produção de *pellet feed* que inicialmente foi concebido para uma capacidade de produção de 1,2 MTPA (com a utilização da mesma logística do projeto anterior de produção de lump ore e sinter feed com distância de transporte de 540 km). Esta capacidade foi definida em função da limitação de capacidade de transporte da linha ferroviária da CFN de 100.000t por mês.

A partir de 2013 após a conclusão de estudos, foi definida internamente a mudança para um novo projeto, que prevê a produção de 2,0 MTPA com uma logística rodoviária para Porto do Mangue/RN, com distância de transporte de 155 km e utilização de navios graneleiros do tipo capesize (ver rota de exportação terrestre – Figura 3.4).

Figura 3.4: Rota de exportação terrestre.



Fonte: Acervo da Mineração MHAG.

3.4 INFRAESTRUTURA LOCAL

Na Mina do Bonito existe atualmente uma infraestrutura básica composta por estrada de acesso, escritório, refeitório, ambulatório, vestiário, laboratório, oficina, galpões etc. e redes de água, esgoto, energia elétrica e sistema de comunicações. Esta infraestrutura será aproveitada, reformada e ampliada.

A água será captada no açude da Barragem Armando Ribeiro Gonçalves, distante cerca de 1 km da Mina do Bonito. A MHAG Mineração possui outorga para uso de água emitida pela Agência Nacional de Águas (ANA).

Atualmente não existe energia elétrica disponível para utilização industrial, que é gerada a partir de grupos geradores a óleo diesel. Será construído um sistema elétrico completo com entrada de linha, linha de transmissão e subestações rebaixadoras principal e secundárias para atendimento da demanda de energia elétrica para o projeto.

3.5 DIREITOS MINERÁRIOS

Os direitos minerários correspondem ao processo DNPM 848.211/2003 que está em nome da empresa Mhag Serviços & Mineração S/A. Neste processo se encontra inserido a Mina do Bonito.

3.6 GEOLOGIA

O minério de ferro predominante na Mina do Bonito é do tipo itabirito, de baixo teor de Fe < 30 %, com baixo nível de contaminantes.

3.7 SONDAGEM

No ano de 2004 foi realizada a primeira campanha de sondagem rotativa diamantada com 22 furos e 620 m perfurados, com foco no minério de ferro do tipo magnetitito para produção de *lump ore* e *sinter feed*.

Durante os anos de 2007 a 2009 foi executada a segunda campanha de sondagem rotativa diamantada com foco no minério de ferro do tipo itabirítico para produção de pellet feed. Foram executados 122 furos de sonda em diâmetros HQ e NQ, totalizando 16.292 m perfurados, que posteriormente foram modelados para definição dos recursos de minério de ferro.

3.8 RESERVAS MINERAIS

As reservas de minério de ferro da Mina do Bonito foram calculadas pela empresa Gemcom do Brasil no ano de 2012. Após o modelamento dos 122 furos de sonda da segunda campanha de sondagem definiu-se o recurso de minério de ferro total da Mina do Bonito que é de 240 Mt com teores globais de 25.75% de Fe e 54.18% de SiO₂.

A vida útil atual da Mina do Bonito é de 20 anos. A produção estimada de minério até o final da vida útil é de 6,6 Mt de por ano para uma produção de produto final na usina de 2,0 Mt por ano. Este produto final processado e gerado na usina de processamento de minério tem o nome comercial de pellet feed, um concentrado superfino de minério de ferro.

A relação estéril minério é de 1,07, ou seja, para cada tonelada de minério será lavrada 1,07 t de estéril.

3.9 PLANEJAMENTO DE LAVRA

A lavra na Mina do Bonito será a céu aberto, em flanco, em bancadas descendentes de 10m de altura em meia encosta seguindo a declividade natural da Serra do Bonito, com a utilização de equipamentos convencionais. Futuramente a lavra entrará em cava até as cotas inferiores.

3.10 LAVRA

A lavra será feita conforme o esquema apresentado a seguir:

- Perfuração: será realizada no itabirito compacto (60 % do total) por perfuratrizes hidráulicas com 3” de diâmetro de furo
- Desmonte com Explosivos: utilização de explosivos dos tipos ANFO e emulsão com acessórios de detonação
- Desmonte Mecânico: serão utilizados tratores de esteiras e onde houver possibilidade escavadeiras hidráulicas (40 % do total)
- Carregamento: será feito com escavadeiras hidráulicas e também com pás carregadeiras de pneus para flexibilizar a lavra.
- Transporte: será feito com caminhões basculantes rodoviários que transportarão o minério até a usina de processamento e o estéril para a pilha de estéril, que será construída de acordo com os padrões construtivos e todas as exigências ambientais vigentes.

3.11 INFRAESTRUTURA

Tratores de esteiras, motoniveladoras, retroescavadeiras, carretas com prancha rebaixada e caminhões pipa farão os serviços auxiliares, de terraplenagem e de apoio às operações de lavra.

3.12 USINA DE PROCESSAMENTO

Basicamente as principais etapas do processamento do minério serão as operações de britagem e peneiramento, moagem, separação magnética, classificação, deslamagem, espessamento e filtragem. Na filtragem será gerado o pellet feed.

3.13 FISIOGRAFIA

O município de Jucurutu situa-se na zona fisiográfica do semiárido Seridó, na porção central do estado do Rio Grande do Norte, integrando a Mesorregião Oeste Potiguar e a Microrregião do Vale do Açu, Zona Homogênea do Planalto das Serras Centrais. Com uma área de 962,2 km² representa 1,81% da superfície estadual.

O relevo da região e da área caracteriza-se por ser uma área rebaixada, com topografia predominante suave ondulada, limitada a leste e oeste por grandes elevações (altitudes entre 500 e 800m). O relevo em geral é constituído por colinas de topos achatados e arredondados, apresentando vertentes curtas ou médias, onde as declividades variam de 3% a 10% e vales em forma de “V” ou abertos. Em menor proporção ocorre o relevo ondulado e plano. As altitudes variam de 50 a 300 metros.

O município encontra-se com 100% do seu território inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas Açu. A rede hidrográfica que passa nas proximidades da área é constituída pela Barragem Armando Ribeiro Gonçalves, parte complexo hidrográfico do Rio Piranhas Açu, distante aproximadamente 3 Km a oeste das áreas dos processos DNPM/RN N^o 848.211/003, 848.212/003, 848.224/003 e 848.227/003, e seus afluentes principais, como os riachos Barra Branca, João Grande e Tapera, todos de caráter temporários e de pequeno porte. Em geral os riachos existentes exibem curso nordeste e secundariamente de oeste para leste, orientados fortemente segundo estruturas geológicas da região.

Todos os raros e pequenos riachos e afluentes (ravinas) que cortarem a área terão suas áreas de Preservação Permanente, faixa de 30 metros de cada lado conservada. O sistema hidrográfico do município encontra-se com 100% do seu território inserido na Bacia Hidrográfica do rio Piranhas-Assú. O manancial hídrico mais importante da região é a Barragem Armando Ribeiro Gonçalves e recentemente a construção da Barragem Oiticica, que faz parte complexo

hidrográfico. Composto o sistema hidrográfico da região, encontram-se vários pequenos riachos, tais como: o Riacho da Roça, Riacho dos Bois, Riacho da Umburana, Riacho do Jericó, Riacho da Pomba, Riacho da Barra Branca, João Grande e da Tapera. Além dos riachos, conta-se com dezenas de pequenos açudes.

O potencial hídrico superficial apresenta-se baixo, devido à ocorrência de fatores adversos como solos arenosos, pouco espessos, com escoamento torrencial e má distribuição pluviométrica. Esses fatores condicionam à área um potencial hídrico fraco, com excedente no intervalo de 10 a 200mm com distribuição anual em torno de 3 a 6 meses, classificada como concentrada.

CAPÍTULO IV – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

4.1 PRODUÇÃO PREVISTA DE ESTÉRIL E REJEITOS DA MINA BONITO

As reservas de minério de ferro da Mina Bonito foram calculadas após modelamento de 122 furos executados totalizando 16.292,00m, uma estimativa de 40 MT.com teores globais de 25.75% de minério de ferro (Fe), com peso específico médio 1,27t/m³, e relação estéril e minério da ordem de 1,07. Com previsão estimada em 20 anos de operação da mina.

- Volume de Estéril durante a vida útil: 34.000.000.00m³
- Volume de Rejeitos durante a vida útil: 24.000.000.00m³
- Volume de Estéril e Rejeitos durante a vida útil: **58.000.000.00m³**
- Área Total do Processo da Mina Bonito: 425,44ha
- Área Atual do Processo Explorada.....: 100,00ha
- Área Remanescente para Exploração e Utilização ...: 325,44ha
- Granulometria média do Rejeito:
 - ✓ Pedregulho: 5%; Areia: 20%; Silte: 60%; Argila: 15%
- Granulometria média do Estéril:
 - ✓ Pedregulho: 75%; Areia: 10%; Silte: 10%; Argila: 5%

Vamos estimar que a disposição de estéril e rejeitos seja projetada para construção de uma única barragem, atendendo um montante 58.000.000,00m³ de solo, durante os vinte anos de vida na operação.

Para atender o suso exposto, imaginaremos poder utilizar da área remanescente uma parcela do terreno com área de 100,00ha, com relevo praticamente plano, representando cerca de 31,00% da área remanescente. Esta alternativa implica na altura média de uma barragem de rejeitos com 58,00m de altura.

Com a altura de 58,00m, e pela condição geotécnica táctil visual do solo representativo do Estéril e este solo sendo utilizado no projeto de Barragem de Rejeitos, alteadas pelo processo de jusante, por exemplo, isto implica em cerca de 12 alteamentos incluindo a folga mínima, com altura média em torno de 5,50m., No que estimamos seja a altura crítica do solo classificado como Estéril para prover a estabilidade do maciço.

Essa solução seria impraticável para as condições do terreno de propriedade da Mina Bonito, tanto pelo aspecto de disponibilidade de área, como do relevo e principalmente pela proximidade da bacia hidráulica da Barragem Armando Ribeiro, cerca de 500,00m de distancia dependendo da altura de água da Barragem em tela à época, ou seja, a Mina Bonito se encontra praticamente dentro da Área de Proteção Permanente da Barragem Armando Ribeiro.

Como acima comentado, para solução de uma única barragem de rejeitos receberem a totalidade de Estéril e Rejeitos e pelas condições geológicas e físicas da mina é praticamente impossível. Entretanto na região do município de Jucurutu, encontram-se locais apropriados e com condições geológicas, topográficas, hidráulicas, sustentável do ponto de vista ambiental e principalmente pelo aspecto de segurança; para construção de barragem de rejeitos com capacidade de receber os Estéril e Rejeitos produzidos pela mina, durante os vinte anos de operação. A condição para que isto aconteça, haverá a necessidade de ser adquirido o terreno pela administração da mina, em locais previamente estudados e que atenda o estado da arte atual.

4.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A ESCOLHA DO LOCAL DE IMPLANTAÇÃO DE BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS NO SEMIÁRIDO NORDESTINO

Serão muitas as variáveis que se consideram na escolha de locais para a implantação de barragens de rejeitos. Apresentaremos uma revisão dos principais fatores a considerar neste tipo de tomada de decisões a partir da experiência verificada no Brasil, principalmente no Estado de Minas Gerais.

Os estudos para seleção dos locais para implantação de uma barragem dependem dos fins para os quais a obra se destina e deverão ser desenvolvidos durante a fase de estudos de viabilidade de forma a definir o local que permita a solução tecnicamente mais favorável e a mais econômica.

Nessa fase deverão ser desenvolvidos estudos sobre os acessos, estudos de hidrologia e de meteorologia, estudos gerais sobre a fundação e características geológicas do local, disponibilidade de materiais para a construção e avaliação das condições para a execução da obra e avaliado o impacto ambiental motivado pela construção da barragem e pela formação do lago.

Alguns critérios a ponderar na seleção do local são as condições topográficas, aspecto importante uma vez que se procura minimizar os volumes dos materiais para a construção e adotar a melhor fundação e as melhores localizações para as restantes obras, como descarregadores, centrais, condições geológicas e volume do lago.

As condições geotécnicas do local da barragem deverão ser investigadas, nomeadamente quanto à possibilidade da ocorrência de deslizamentos significativos de massas de terras e rocha das encostas, nomeadamente por variações do nível da barragem e por movimentos sísmicos.

A consideração das ações sísmicas pode determinar às decisões a tomar na fase de projeto de uma barragem de rejeitos. O estudo da sismicidade do local e a análise do comportamento sísmico de uma obra devem ser considerados nas fases que antecedem o projeto e em conjunto com os restantes estudos.

As características da topografia do vale no local de uma barragem podem também influenciar as características do sismo, as características geológicas diferentes da fundação e das ombreiras podem afetar a resposta sísmica de uma barragem de rejeitos, podendo determinar os tratamentos a realizar no maciço.

De conformidade com o que verificamos analisando o estado da arte atual nos vários capítulos desta dissertação, com fulcro na escolha de melhores locais para implantação de Barragens de Rejeitos, em relação ao semiárido nordestino e especificamente ao “Estudo de Caso” a mina Bonito, concluímos:

No mapa do Nordeste (Figura 4.1), a posição da Mina Bonito e as respectivas distâncias são: para as Barragem Armando Ribeiro (25,00km) em Açú, Barragem Umari (32,00km em Upanema, Barragem Santa Cruz do Apodi (89,00km) em Apodi, todas no Estado do RN e Barragem Castanhão (169,00km) e Barragem Orós (218,00) km no Estado do Ceará.

4.2.1 Análise da ocorrência do deslizamento

Dados estatísticos sobre as principais causas de acidentes de barragens de contenção de rejeitos mostram que os processos de ruptura estão em sua maioria ligados ao fenômeno de “piping/renard” (erosão interna progressiva) e liquefação, alcançando segundo alguns autores valores acima de 71%.

Liquefação, segundo definição apresentada em glossário de termos técnicos, “é a repentina redução da resistência ao cisalhamento de um solo devido a um acréscimo rápido da pressão intersticial, fenômeno este normalmente ligado às solicitações dinâmicas sobre solos granulares”.

As principais solicitações dinâmicas responsáveis pelos processos de liquefação são os terremotos, impacto de ondas, explosões, tráfego de equipamentos pesados, cravação de estacas e injeções de líquido com pressão.

Quadro 4.1: Exemplos de rupturas de barragens de contenção de rejeitos.

Ano	Mina/Local	Causas da Ruptura	Danos Provocados
1965	El Cobre - Chile	Terremoto/liquefação	210 vítimas, soterramento do povoado.
1970	Mufaline Mine/África	Não definida	89 vítimas – 453.000 m ³ de rejeitos saturados.
1972	Buffalo Creek/West - Virginia	Não definida	110 mortos, 1.100 feridos, 1.500 casas destruídas – 595.000 m ³ de lama.
1974	Impala Platinum África do Sul	Entubamento (piping)	12 vítimas, 3 milhões m ³ de lama fluíram por 45 km, destruindo estradas, pontes e soterrando reservatório de água potável.
1985	Prealpi/Trento - Itália	Material de construção	Liberção de 200.000 m ³ de rejeitos. 268 vítimas.
1985	Cerro Negro/Chile	Sismo induzido e liquefação	Lama dos rejeitos fluíu até 85 km a jusante.
1985	Pico S.Luiz/Minas Gerais	Solapamento do pé do aterro e entubamento	Lama fluíu até 10 km a jusante. Pontes e estrada de ferro.
1986	Fernandinho/Itaminas - MG	Liquefação	4 vítimas. Destruição de laboratórios e equipamentos.
1996	Mina do Porco/Bolívia	Entubamento (piping)	3 vítimas – Fazendas, gado, flora e fauna; 300 km de rio contaminados.

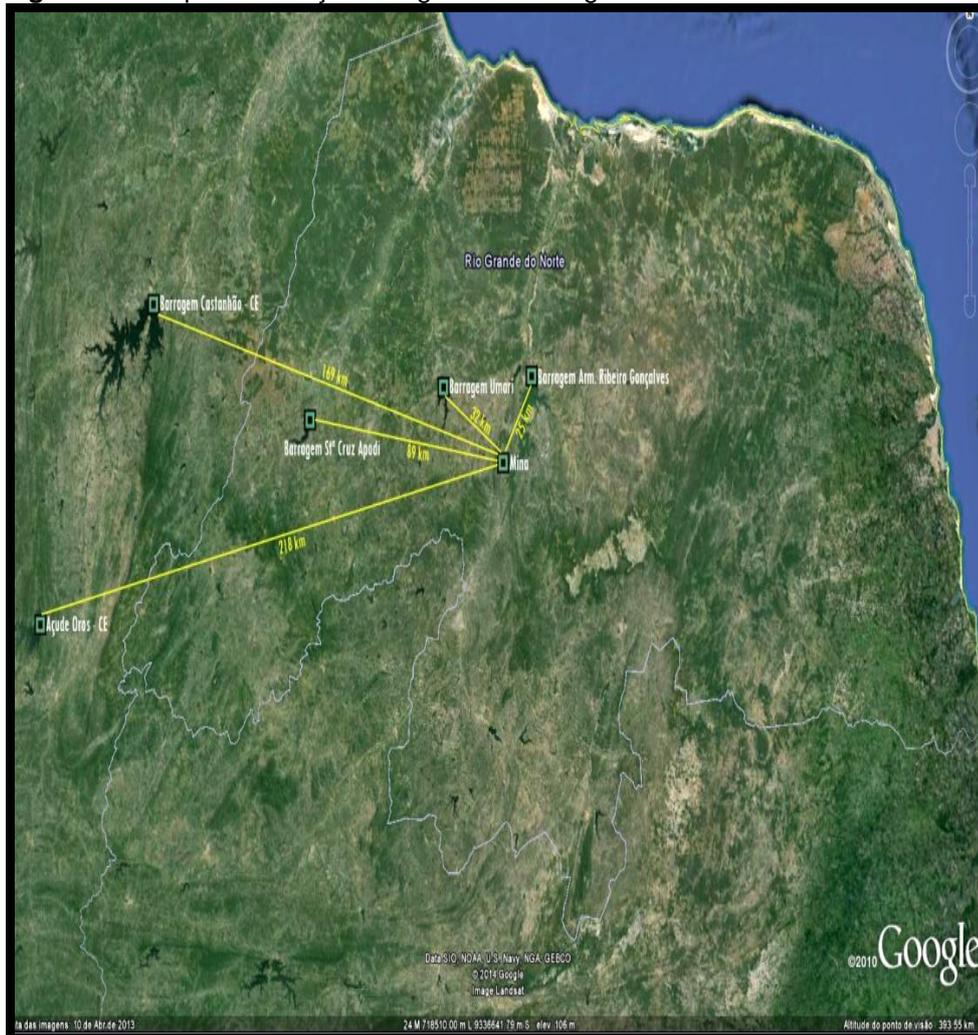
Fonte: CETEM Barragens de Rejeitos (SOARES, 2010).

Quadro 4.2: Principais causas de acidentes em barragens de rejeitos.

Causas	Número de Acidentes	Frequência Relativa (%)
Liquefação	21	46,7
Entubamento	11	24,4
Não definida	13	28,9
TOTAL	45	100,0

Fonte: Arnez (1999).

Figura 4.1: Mapa de situação das grandes barragens do Nordeste.



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Diante das observações discutidas sobre as principais causas de acidentes em barragem de contenção de rejeitos, entende-se que a concepção do projeto de um sistema de disposição de rejeitos de mineração exige o conhecimento de todas as características dos materiais com os quais serão realizadas as obras. Além disso, outras considerações devem ser levadas a efeito: a dinâmica construtiva, o conjunto de operações da mina e também as características do meio físico e sísmico no qual as obras estarão inseridas. Em resumo, trata-se de um projeto multidisciplinar.

4.2.2 Sismicidade induzida pelo homem

Algumas atividades antropogênicas de larga escala apresentam certo potencial para afetar o ambiente sismotectônico, desencadeando uma categoria especial de sismos denominados “sismos induzidos”. Como resultam da interação

do homem com a natureza, na construção de grandes obras de engenharia, são também denominados sismos induzidos pelo homem.

Cinco tipos principais de atividades humanas podem afetar o ambiente sismotectônico em suas áreas de influência, através de mudanças no nível da sismicidade local. São elas:

Os quatro primeiros tipos de atividades, geralmente, induzem pequenos sismos, com magnitudes não superiores a 5,0 na Escala Richter. Entretanto, relativamente ao tipo (iv), alguns testes nucleares realizados na década de 60, com potência da ordem de dezenas de megatons (01 megaton = 106t de Trinitrotolueno-TNT), produziram sismos artificiais de magnitudes da ordem de 7. Os sismos induzidos por reservatórios, embora sejam geralmente de pequenas magnitudes, podem, às vezes, atingir magnitudes moderadas (entre 5 e 6,5 na Escala Richter). Sismos dessa magnitude podem produzir severos efeitos macrossísmicos associados, com vítimas humanas e prejuízos materiais consideráveis, gerando, portanto, um impacto ambiental e social muito grande (MARZA *et al.*, 1999).

4.2.3 Atividades de mineração e pedreiras

1) Sismicidade induzida por minas e pedreiras

Neste caso, a sismicidade é induzida por variações no esforço elástico, causado pela remoção de grandes quantidades de rochas nas atividades de mineração e pedreiras. Dois tipos de terremotos induzidos podem resultar: aqueles causados pela remoção de materiais em minas profundas, geralmente com ocorrência bem próxima do local de extração (COOK, 1976), e aqueles superficiais, devidos a escavações em minas rasas e à remoção de materiais em pedreiras (POMEROY *et al.*, 1976).

Na região em estudo as explosões ocorrem com bastante regularidade, principalmente em Mossoró com extração de calcário para fabricação de cimento, a própria atividade da Mina Bonito com a extração de minério de ferro usando explosivos no seu desmanche e mais recentemente a construção da Barragem Oiticica em Jucurutu distante da mina cerca de 20,00km. Na região só não temos explosões atômicas, veículo que também desencadeia sismos induzidos.

2) Sismicidade induzida pela injeção profunda de fluídos sob alta pressão

Com relação à injeção profunda de fluídos sob alta pressão, este processo é praticado na região de influência das grandes barragens, pela exploração de petróleo pela Petrobras em seus campos de produção.

A injeção de fluídos sob alta pressão em furo produziu o mais bem documentado e bem entendido caso de sismicidade induzida (SIMPSON, 1986). De abril de 1962 a setembro de 1963, registraram-se mais de 700 eventos sísmicos, com magnitudes entre 1.0 e 4.3, nas proximidades de Denver (Colorado), região bastante estável, com rara incidência histórica de terremotos (EVANS, 1966). Os epicentros localizavam-se perto de um arsenal militar que produzia líquidos de natureza tóxica. Para evitar problemas ambientais e de segurança, os fluídos eram bombeados para o interior de poços profundos, até que se observou uma correlação direta entre os bombeamentos e a ocorrência de tremores de terra. Isso porque o incremento da pressão da água através dos poros e microfaturas das rochas em profundidade reduzia o esforço tectônico efetivo, facilitando o deslocamento de eventuais blocos falhados.

Munidos dessas observações, os cientistas do Serviço Geológico Americano (USGS) decidiram por em prática um teste especial, numa área de extração de petróleo desativada, em Rangely, também no Colorado. A água foi alternadamente injetada e bombeada, enquanto as mudanças no nível da sismicidade eram registradas por meio de uma rede sismográfica local. Verificou-se que, ao alcançar determinado nível, a pressão do fluido desencadeava tremores de terra, que cessavam quando a pressão era retirada (RALEIGH *et al.*, 1979).

Em outro experimento realizado em 1970, em Matsushiro, Japão, a tese de que os terremotos podem ser induzidos pela pressão da água nos poros das rochas também foi comprovada. Neste caso, o fluído foi injetado sob alta pressão num poço de 1.800 metros de profundidade. Esses acontecimentos demonstraram a importância da água como mecanismo disparador de sismicidade e indicaram que é possível pensar no controle de pequenos terremotos (OHTAKE, 1974).

Na região em tela a Companhia de Águas do RN (CAERN) faz a extração de água em diversos municípios, principalmente na região de Mossoró, onde o aquífero é em região carstica, rocha sujeita a formação de cavernas que poderá contribuir para atividade sísmica, com o desmoronamento das cavernas. Além da extração de

petróleo, contribuindo e desequilibrando as forças telúricas, água, petróleo e avanço da cunha salina ao continente.

3) Sismicidade induzida pela remoção de fluido

Há exemplos de terremotos induzidos por uma causa oposta à injeção de fluídos, isto é, os terremotos induzidos por extração de fluídos. Quando fluídos são extraídos das rochas, através da exploração de petróleo, água ou gás, há uma redução substancial na pressão sobre as rochas, sugerindo, portanto, que o potencial para induzir sismos também será reduzido. Isto, porém, não é verdade.

De acordo com a teoria da poroelasticidade, a extração de fluídos pode, às vezes, reduzir suficientemente a pressão dos poros de uma área de modo a alterar localmente o estado dos esforços tectônicos, induzindo, desta forma, sismos. A maioria dos mecanismos de falhamento associados é de falhamento inverso ou normal (DAVIS *et al.*, 1993). Exemplos de sismos induzidos por extração de fluídos são apresentados nos EUA (centro-sul do Texas), Canadá (Alberta), França (Lacq).

4) Sismicidade induzidas por explosões nucleares

Sismos podem ser induzidos também pela realização de testes nucleares subterrâneos. Uma explosão nuclear pode desestabilizar o estado dos esforços tectônicos, produzindo fraturas nas rochas e diminuindo a resistência ao cisalhamento. E, até que haja uma acomodação no estado dos esforços, será verificada uma sismicidade induzida que pode ser detectada por uma rede sismográfica local.

Investigações feitas no polígono de testes nucleares de Nevada (EUA) mostraram casos em que detonações nucleares subterrâneas foram imediatamente seguidas por tremores semelhantes aos pós-abalos ou réplicas de grandes sismos naturais (BOLT, 1976). Um exemplo excepcional é o caso da explosão nuclear subterrânea feita em 19 de novembro de 1968, no campo de testes de Nevada, com uma capacidade explosiva de 1,1 megaton, equivalente a uma energia sísmica correspondente a um terremoto de $m_b = 6,5$ (BATH, 1979). Imediatamente após a detonação, réplicas foram observadas até 15 km de distância, aproximadamente. Os geólogos determinaram que os pós-abalos foram desencadeados, principalmente, porque a explosão liberou os esforços tectônicos naturais existentes na área da explosão (KISSLINGER, 1976).

Na região em estudo as explosões ocorrem com bastante regularidade, principalmente em Mossoró com extração de calcário para fabricação de cimento, a própria atividade da Mina Bonito com a extração de minério de ferro usando explosivos no seu desmanche e mais recentemente a construção da Barragem Oiticica em Jucurutu distante da mina cerca de 22,00km. Na região só não temos explosões atômicas, veículo que também desencadeia sismos induzidos.

5) Enchimento de reservatórios na construção de barragens

Este é o tipo mais comum de sismicidade induzida e também o menos entendido. A massa de água do reservatório representa uma carga adicional que causa um crescimento significativo na tensão elástica, enquanto o crescimento na pressão nos poros pode ser gerado de duas maneiras: diretamente, através da infiltração da água do reservatório, e indiretamente, através do fechamento dos poros e fraturas saturadas abaixo do reservatório. O carregamento superficial produzido por cada metro de água é de 0,1 bar ou cerca de 20 bars num reservatório do porte do reservatório de Itaipu Binacional (com uma profundidade de 180 m).

O que acontece com a água num grande reservatório? A construção da barragem cria um novo lago, que irá alterar as condições estáticas das formações rochosas do ponto de vista da mecânica (em virtude do próprio peso da massa d'água) e do ponto de vista da hidráulica (em consequência da infiltração do fluido, que causa pressões internas nas camadas rochosas profundas). A combinação das duas ações pode desencadear distúrbios tectônicos e, eventualmente, gerar sismo, caso as condições locais sejam propícias (existência de falhas e esforços convenientemente orientados).

A principal relação constatada entre o enchimento do reservatório e a indução de movimentos no interior do seu embasamento rochoso parece ser atribuída ao acréscimo de pressão neutra ao longo dos planos de descontinuidade do maciço rochoso, que reduzirá as pressões neutras normais responsáveis pela resistência ao cisalhamento ao longo desses planos. Isso corresponderia a deslocar, no sentido da origem das abscissas, o semicírculo representativo das tensões normais, provocando o seu tangenciamento à envoltória de ruptura.

Tem sido um consenso entre os estudiosos do assunto que tal situação somente ocorreria se o maciço já fosse potencialmente sísmico, ou seja, se as

condições estruturais da área do reservatório fossem consequentes de uma tectônica com evidências de reativações, mormente pós-terciárias.

Isso justifica a completaria a completa ausência de sismos na maioria dos reservatórios, principalmente os relacionados com as barragens de porte bastante elevado. Outras causas aventadas são:

a) Energia potencial armazenada pela depressão elástica da crosta em pontos onde as tensões já são consideráveis, possibilitando a liberação de energia sísmica.

b) Reajustamento das camadas do subsolo em decorrência da sobre carga do reservatório.

c) Processos químicos tais como a hidratação de moléculas de silicone-oxigênio, enfraquecendo o material e ocasionando fadiga estática; esse fenômeno é responsável pela formação de novas fissuras na rocha, permitindo a penetração da água a maiores profundidades.

d) O reservatório poderia mudar as propriedades mecânicas do meio, tornando-o mais heterogêneo como um todo e, portanto, menos resistente para suportar cargas.

A região em que está localizada a Mina Bonito se enquadra devido às atividades humanas acima explanadas, excetuando a ação de explosões atômicas. Entretanto a possibilidade da potencialização de sismos induzidos na região da mina cresce em função das falhas geológicas abaixo descritas.

Na região em estudo a sismicidade intraplaca, a causa de sismos ainda não é bem conhecida e, em muitos casos, as falhas sísmicas não estão associadas à falhamentos em superfície. O Nordeste do Brasil tem apresentado uma intensa atividade sísmica nas últimas décadas, principalmente na borda da Bacia Potiguar nos Estados do Ceará e do Rio Grande do Norte. Embora a relação entre sismicidade e feições geológico-geomorfológicas não esteja compreendida, diversos modelos já foram apresentados para explicar a sismicidade em bacias do tipo "rift": (i) reativação de zonas de fraquezas pré-existentes; (ii) arqueamento da litosfera gerando esforços distensivos; (iii) concentração de esforços nas rochas do cristalino em torno da bacia.

Quadro 4.3: Listagem dos principais eventos sísmicos ocorridos na região de aproximadamente 300 km em torno da área de inundação do Açude Castanhão.

Localização da região epicentral	Data de registro do Evento	Magnitude	Intensidade Máxima Observada (MM)	Distância da parede do Açude Público do Castanhão (km)	Estimativa da intensidade na área do Açude do Castanhão (MM)
Açu	08/08/1808	4,8	VI	155	IV
Baturité	1903	4,1	VI	168	III
Aracati	14/04/1928	4,0	VI	195	III
Dr. Severiano/Pereiro	12/01/1968	3,9 m _b	III-IV	61	III
Dr. Severiano/Pereiro	15/02/1968	4,1 m _b	VI-VII	61	V
Dr. Severiano/Pereiro	23/02/1968	4,6 m _b	V	61	IV
Dr. Severiano/Pereiro	18/03/1968	3,7 m _b	V-VI	78	V
Pacajus	20/11/1980	5,2 m _b	VII	175	IV-V
João Câmara	21/08/1986	4,3 m _b	VI	302	III
João Câmara	30/11/1986	5,1 m _b	VII	302	IV
Groaíras	01/04/1988	4,1 m _b	V-VI	276	II
Palhano	29/10/1988	4,1 m _R	V	141	III
Palhano	27/03/1989	4,5 m _R	V	141	III
Irauçuba	19/04/1991	4,8 m _b	VI-VII	262	II
Tabuleiro Grande	29/08/1993	2,2 m _b	III	75	-
Cascavel	11/08/1994	3,6 m _b	V	175	III
Cascavel	22/04/1995	3,5 m _b	V	175	III
Groaíras	10/05/1995	3,4 m _b	IV-V	276	II
Cascavel	19/09/1997	3,5 m _b	V	175	II

Fontes: Ferreira e Assumpção (1983); Barrocal *et al* (1984).

1) João Câmara: trata-se da principal área sísmica da região e do país, com o maior acervo de dados instrumentais, caracterizando uma falha NE transcorrente dextral com componente extensional. A evolução da sismicidade com o tempo permitiu o registro ímpar da nucleação e desenvolvimento de uma falha, cognominada de Falha Sísmica de Samambaia (FSS) (TAKEYA *et al.*, 1989). De acordo com os estudos anteriores (FERREIRA *et al.*, 1987), a falha sísmica não coincide, inclusive na sua direção, com as estruturas pré-cambrianas até então mapeadas.

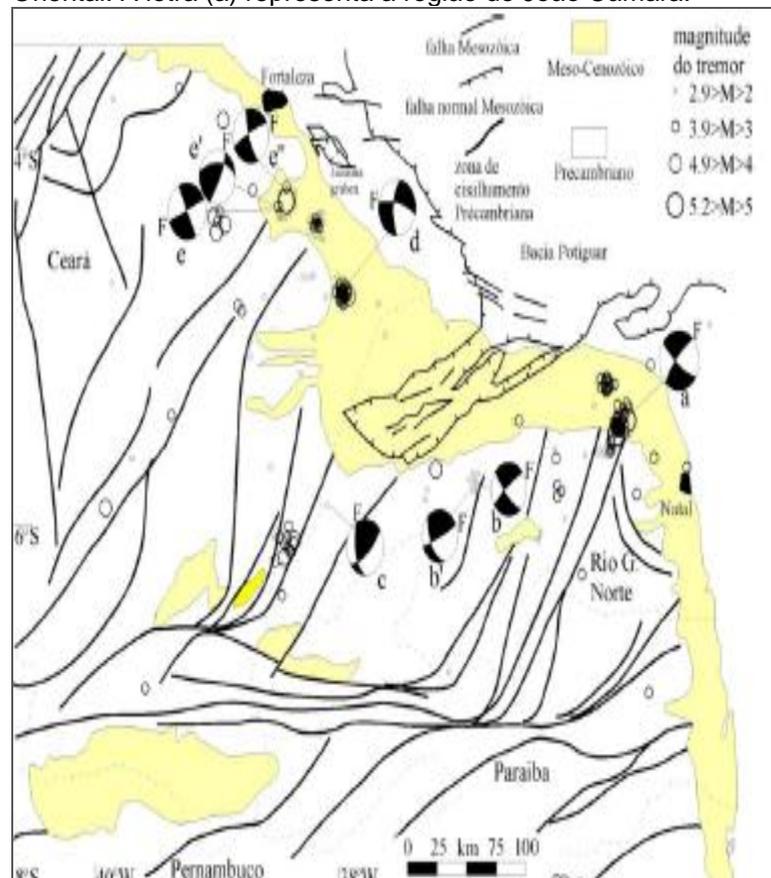
Na região de João Câmara a zona de sismos, definida como falha de Samambaia, apresenta direção N40°E, comprimento de 30km e profundidade de 1-12km. É marcada em superfície pela presença de diques de quartzo e calcedônia. A falha de Samambaia apresenta influência na drenagem e no relevo, mas não

representa reativação da zona de cisalhamento pré-cambriana, que ocorre à Oeste da faixa de sismos.

2) São Rafael: apresenta eventos sísmicos também alinhados segundo a direção NE. A solução de mecanismo focal indica tratar-se de uma falha com rejeito transcorrente dextral (FERREIRA, 1997). A relação do nível d'água da Barragem Armando Ribeiro Gonçalves com os terremotos nesta região foi usada como argumento por Ferreira *et al.* (1995) e Nascimento (1997), de que se trata de sismicidade induzida.

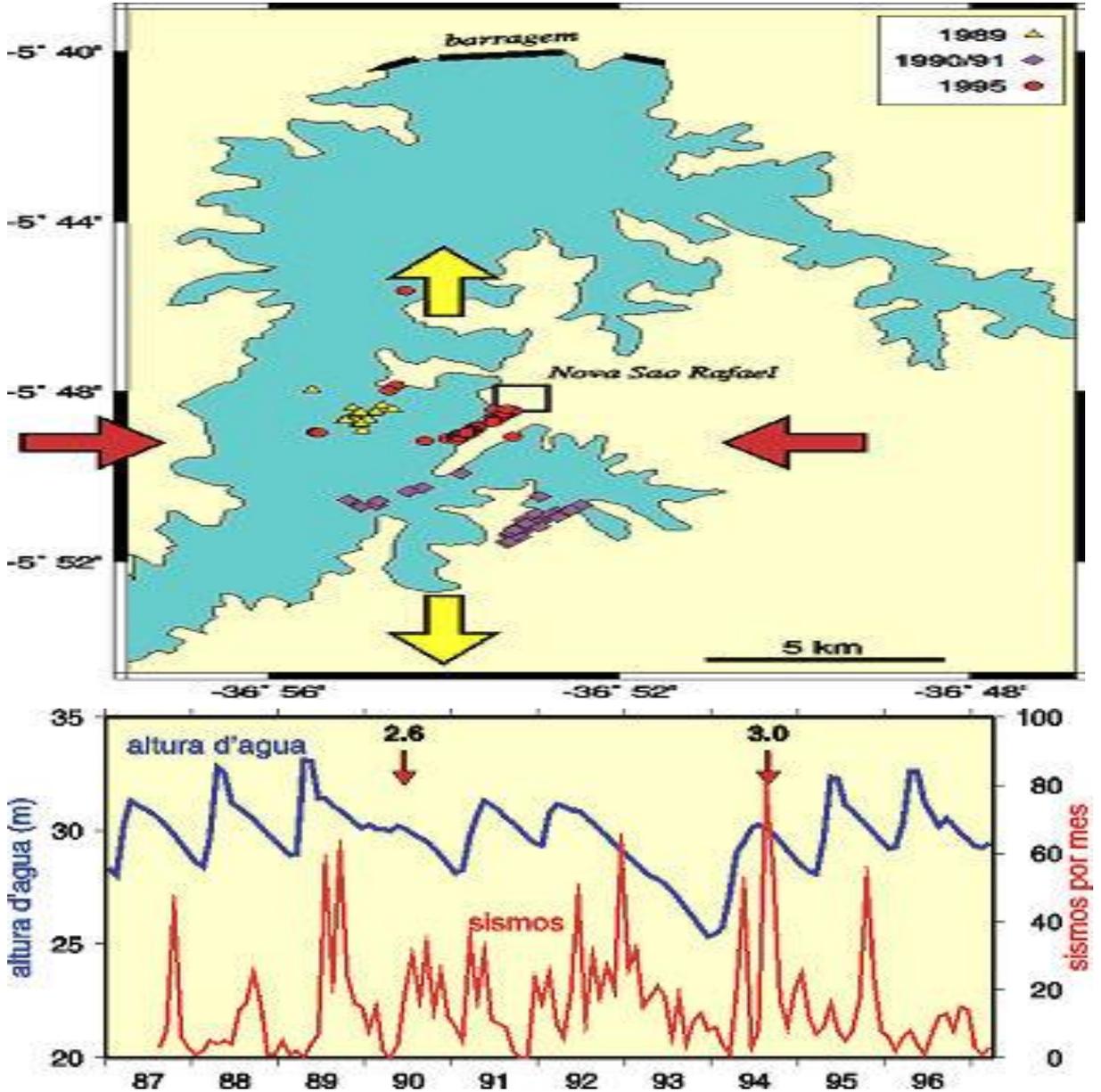
Na região de São Rafael a falha sismogênica é indicada por zona estreita de sismos com direção N40°E, comprimento de 40 km e profundidades de 0,5-4km. Esta falha é evidenciada, em superfície, por uma zona intensamente fraturada, caracterizada por cataclasitos, ultracataclasitos, brechas, sugerindo que estas zonas sofreram vários estágios de reativação em diferentes níveis crustais. A falha de São Rafael ocorre paralela às zonas de cisalhamento pré-cambrianas de direção NNE de movimentação dextral e apresenta forte influência na drenagem e no relevo.

Figura 4.2: Sismicidade e mecanismo focal no Nordeste Oriental. A letra (a) representa a região de João Câmara.



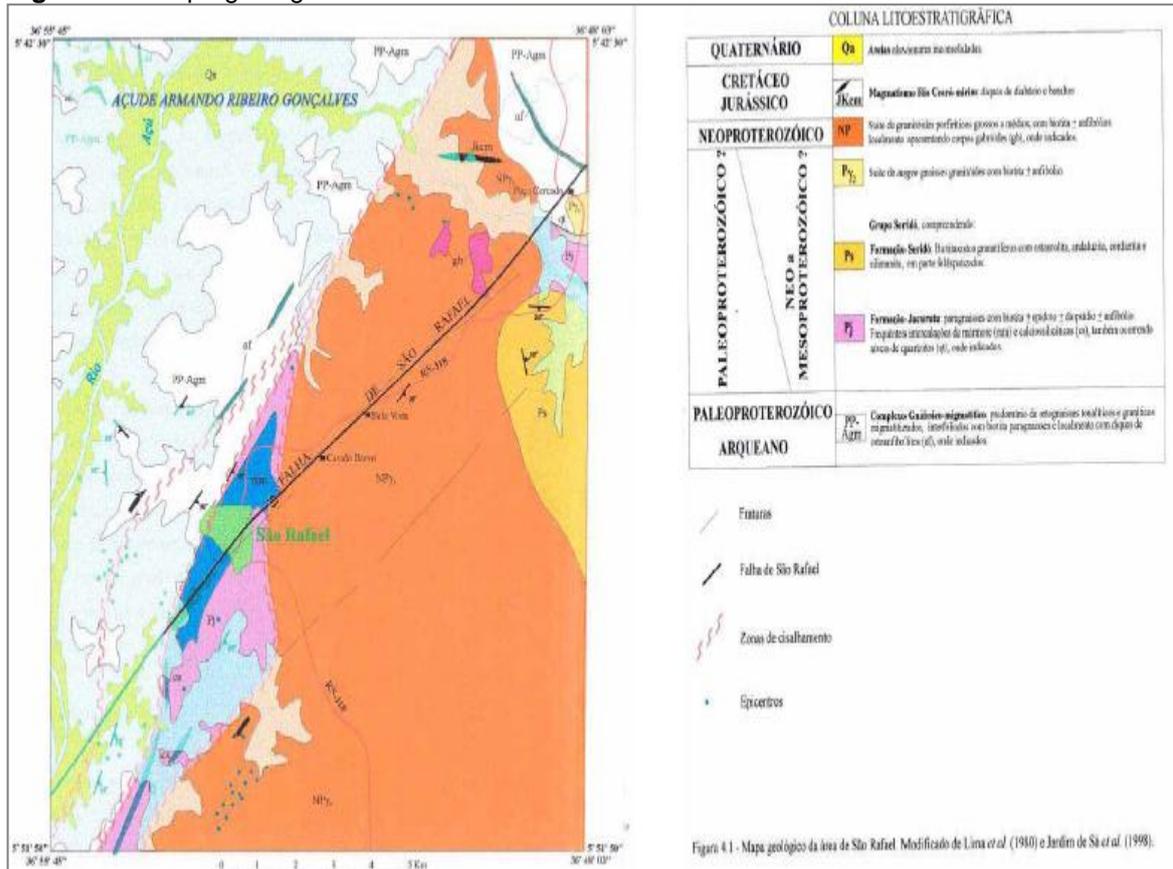
Fonte: Modificada de Barroca *et al.* (1984) e Ferreira *et al.* (1987).

Figura 4.3: Sismicidade induzida pelo reservatório de Assú (RN). (a) Mapa com os epicentros e as tensões neotectônicas da região. Notar a distribuição NE-SW dos epicentros registrados em três períodos diferentes e o quadro atual de tensões indicado pela compressão E-W (setas vermelhas) e distensão N-S (setas amarelas). (b) Variação do nível d'água do reservatório e do número de tremores entre 1987 e 1996. Notar que de 1987 a 1989 os tremores ocorreram alguns meses após o reservatório ter atingido o seu nível máximo d'água.



Fonte: Assumpção e Dias Neto (2000).

Figura 4.4: Mapa geológico da área de São Rafael.



Fonte: Modificado de Lima *et al.* (1980) e Jardim de Sá *et al.* (1998).

4.3 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

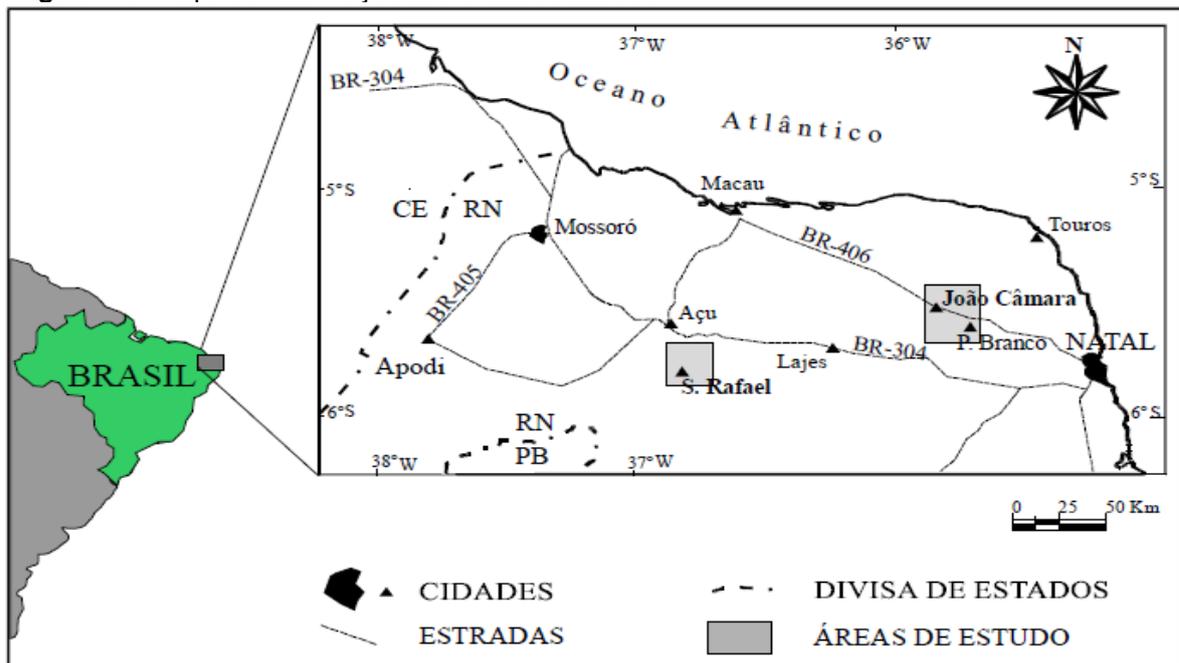
Como exposto a Mina Bonito está situada na zona de influencia de grandes reservatórios do Nordeste, alguns com mais de 100m de profundidade, seja suficiente para fraturar as rochas da base, a coluna de água exercera uma pressão hidrostática, empurrando o líquido através dos poros das rochas e de fraturas preexistentes. Este incremento de pressão pode levar meses ou mesmo anos para avançar distâncias não muito longas, dependendo da permeabilidade do solo e das condições do fraturamento das rochas. No entanto, quando a pressão alcança zonas mais fraturadas, a água é forçada para dentro das rochas, modificando as tensões locais e facilitando o deslocamento de blocos falhados. Este processo é incrementado pela ação lubrificante e de solubilidade da água, que reduz a fricção ao longo das falhas. A água tem ainda o papel de agente químico: ao hidratar certas moléculas, ela enfraquece o material e favorece a formação de novas fissuras, que levam o líquido a penetrar ainda mais profundamente no interior do maciço rochoso (SIMPSON, 1986).

O dia 30 de novembro de 1986 pode ser considerado um marco científico, social e histórico para o Brasil. Na madrugada deste dia, um terremoto de magnitude 5,1 na escala Richter ocorreu nas proximidades da cidade de João Câmara, no estado do Rio Grande do Norte.

Constitui um marco científico, porque despertou o interesse da comunidade geológica para o estudo da atividade sísmica no Nordeste, até então relegada ao segundo plano; social, porque tiveram que ser repensadas e modificadas as maneiras de construções das edificações na região afetada; e histórico, pois, pela primeira vez, a comunidade científica brasileira presenciou e estudou os efeitos físicos de um enxame de tremores, até então só conhecidos através da literatura.

Uma análise entre o contexto geológico-estrutural regional e o quadro sísmológico permitiu selecionar dois sítios, ambos no Rio Grande do Norte (Figura 4.5), que foram estudados dentro da óptica proposta:

Figura 4.5: Mapa de localização das áreas estudadas.



João Câmara – Trata-se da principal área sísmica da região e do país, com o maior acervo de dados instrumentais, caracterizando uma falha NE transcorrente dextral com componente extensional. A evolução da sismicidade com o tempo permitiu o registro ímpar da nucleação e desenvolvimento de uma falha, cognominada de Falha Sísmica de Samambaia (FSS) (TAKEYA *et al.*, 1989). De acordo com os

estudos anteriores (FERREIRA *et al.*, 1987), a falha sísmica não coincide, inclusive na sua direção, com as estruturas pré-cambrianas até então mapeadas.

As primeiras notícias acerca da sismicidade na região de João Câmara remontam a 1950, com pulsos esporádicos e magnitudes aparentemente irrelevantes (Torres, 1994). A partir de agosto de 1986, esta área sofreu uma série de sismos, cujo maior evento atingiu magnitude $m_b = 5,1$ no dia 30/11/86. A liberação de energia por este fenômeno causou rachaduras em inúmeras casas e edificações, algumas delas com danos irreversíveis, colocando em pânico a população daquele município.

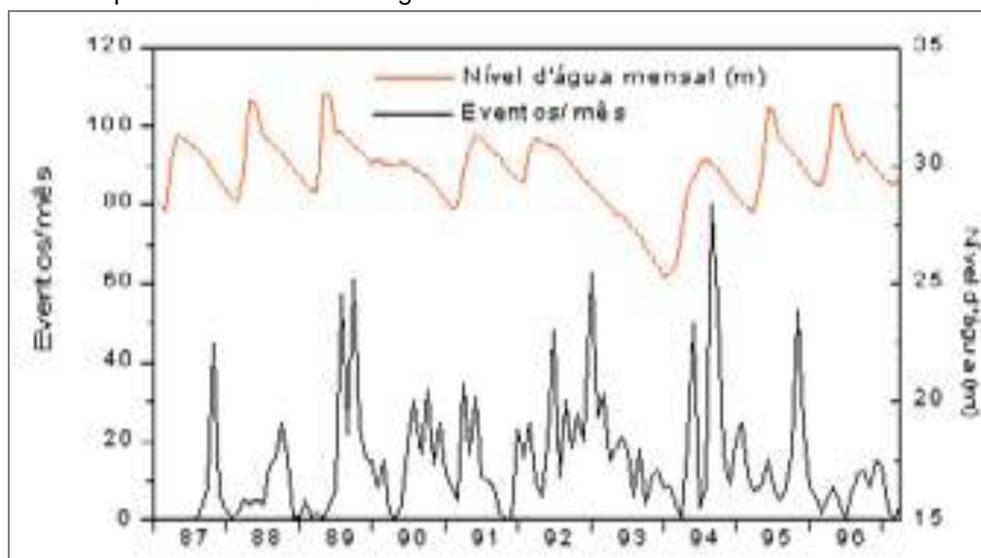
Em consequência, diversos estudos foram efetuados, iniciando pelo monitoramento local através da Estação Sismológica da Universidade de Brasília e do Grupo de Sismologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. No período entre agosto/86 a setembro/96, foram registrados 53.426 sismos, tendo o segundo maior ocorrido em 10/03/1989 com magnitude $m_b = 5,0$. Estes fatos concorrem para que esta região configure-se como o mais importante sítio de atividade sísmica do território brasileiro.

Seus epicentros estão, na grande maioria, concentrados em uma faixa de aproximadamente 30 km de comprimento, de direção N40oE e largura máxima em torno de 4 km, localizada 5 km a leste da cidade de João Câmara. Os estudos de monitoramento indicam que os hipocentros variam de 1 km a 10 km de profundidade, estando situados geologicamente no domínio do Complexo Gnáissico-Migmatítico, ocorrendo tanto na área de afloramentos deste como também abaixo dos sedimentos da Bacia Potiguar, onde foram detectados os sismos de maiores profundidades.

São Rafael – Apresenta eventos sísmicos também alinhados segundo a direção NE. A solução de mecanismo focal indica tratar-se de uma falha com rejeito transcorrente dextral (FERREIRA, 1997). A relação do nível d'água da Barragem Armando Ribeiro Gonçalves com os terremotos nesta região foi usada como argumento por Ferreira *et al.* (1995) e Nascimento (1997), de que se trata de sismicidade induzida.

De acordo com Ferreira (1997), a atividade sísmica de São Rafael constitui um exemplo clássico de sismicidade induzida, ver figura 5.6. Esta estaria sendo causada pelo reservatório da Barragem Armando Ribeiro Gonçalves, iniciada em 1983 e cuja capacidade máxima foi alcançada em 1985.

Figura 4.6: Variações mensais do nível d'água (linha vermelha) e atividade sísmica (linha preta) registrada pela rede sismográfica instalada na Barragem do Açú. Os dados limnimétricos foram fornecidos pelos DNOCS, enquanto que os dados sísmicos pelo Laboratório Sismológico da UFRN.

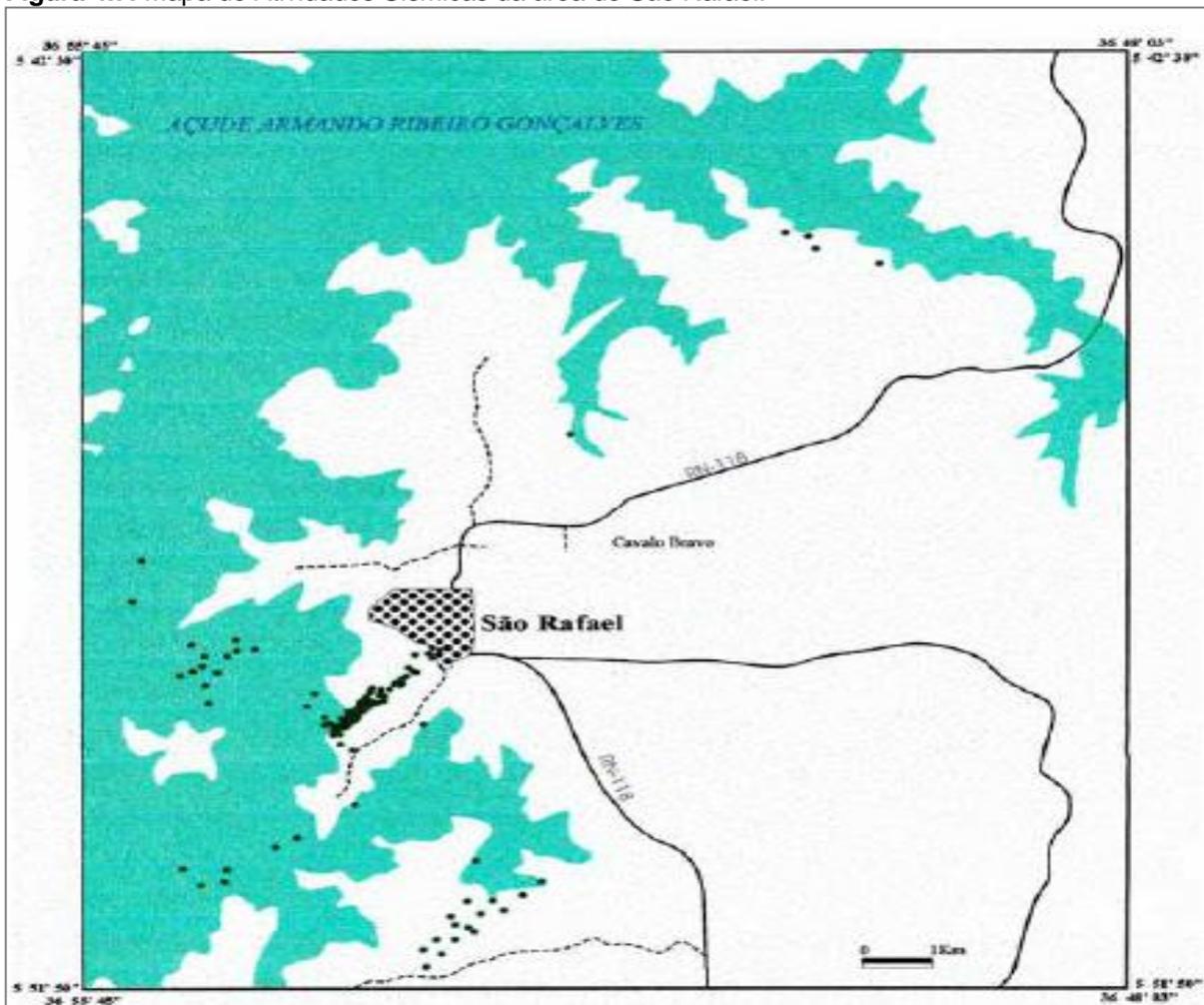


Fonte: Ferreira *et al.* (1995).

Antes da construção da barragem, pelo menos dois eventos sísmicos foram sentidos na região A 8 de agosto de 1808, de magnitude estimada em 4,8 mb por Ferreira e Assumpção (1983), que foi sentido na cidade de Açú, 10 km ao norte da parede da barragem, e em 1930, de intensidade IV-V MM, também na cidade de Açú (FERREIRA, 1997). Segundo este autor, não há evidências da ocorrência de sismos na região, de 1930 até a construção da barragem.

Entretanto, o monitoramento do açude por parte do DFTE/UFRN somente foi iniciado em agosto de 1987 e, logo nos primeiros meses, verificou-se que estavam ocorrendo sismos nas proximidades da cidade de São Rafael. De dezembro de 1987 a dezembro de 1996, mais de 40 eventos de magnitude mb acima de 1,7 foram sentidos pela população dessa cidade (Figura 4.7). Os maiores eventos ocorreram em 13 de junho de 1990 (magnitude 2,6 mb) e em agosto de 1994 (magnitude 2,8). Os eventos registrados variam de 0,5 km a 4 km de profundidade sendo que a maioria tem profundidade menor que 2 km. As soluções de mecanismo focal compostas encontradas por esse autor indica que a atividade sísmica nessa região ocorre praticamente na bacia hidráulica da barragem Armando Ribeiro.

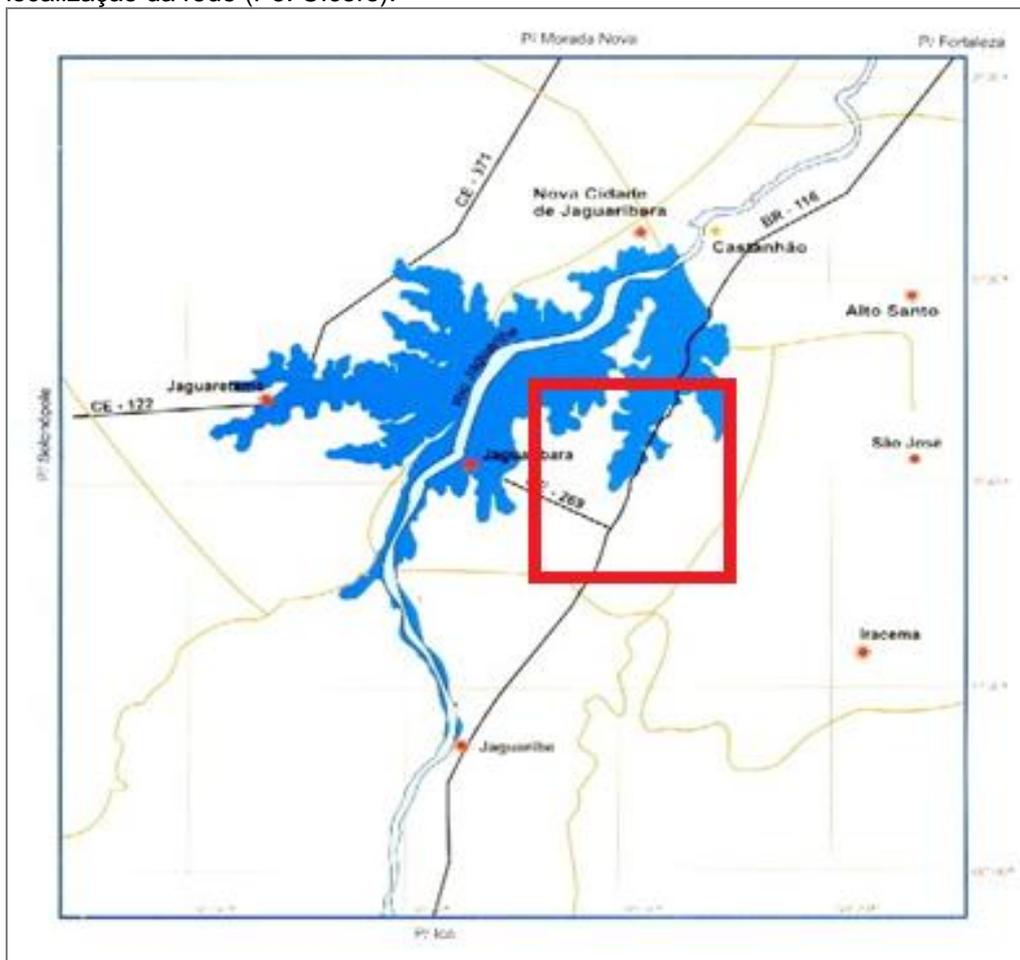
Figura 4.7: Mapa de Atividades Sísmicas da área de São Rafael.



O açude do Castanhão, também conhecido como Padre Cícero, teve como finalidade garantir o abastecimento de várias cidades cearenses. Estima-se que desde o seu enchimento em 2004, o açude tem beneficiado cerca de 2,6 milhões de pessoas possibilitando a irrigação de 43 mil hectares de terra. Como impacto urbanístico, a cidade de Jaguaribara foi inteiramente deslocada formando a cidade de Nova Jaguaribara (Figura 4.8).

Segundo Camarão Junior (2001), até o ano de 2001, não haviam registros históricos ou instrumentais de atividade sísmica na região. Mesmo assim, o autor não descartou a possibilidade de tal atividade. O monitoramento da sismicidade do reservatório do Castanhão ocorre desde o ano de 1997 com ao menos uma estação (analógica ou digital) operando na região.

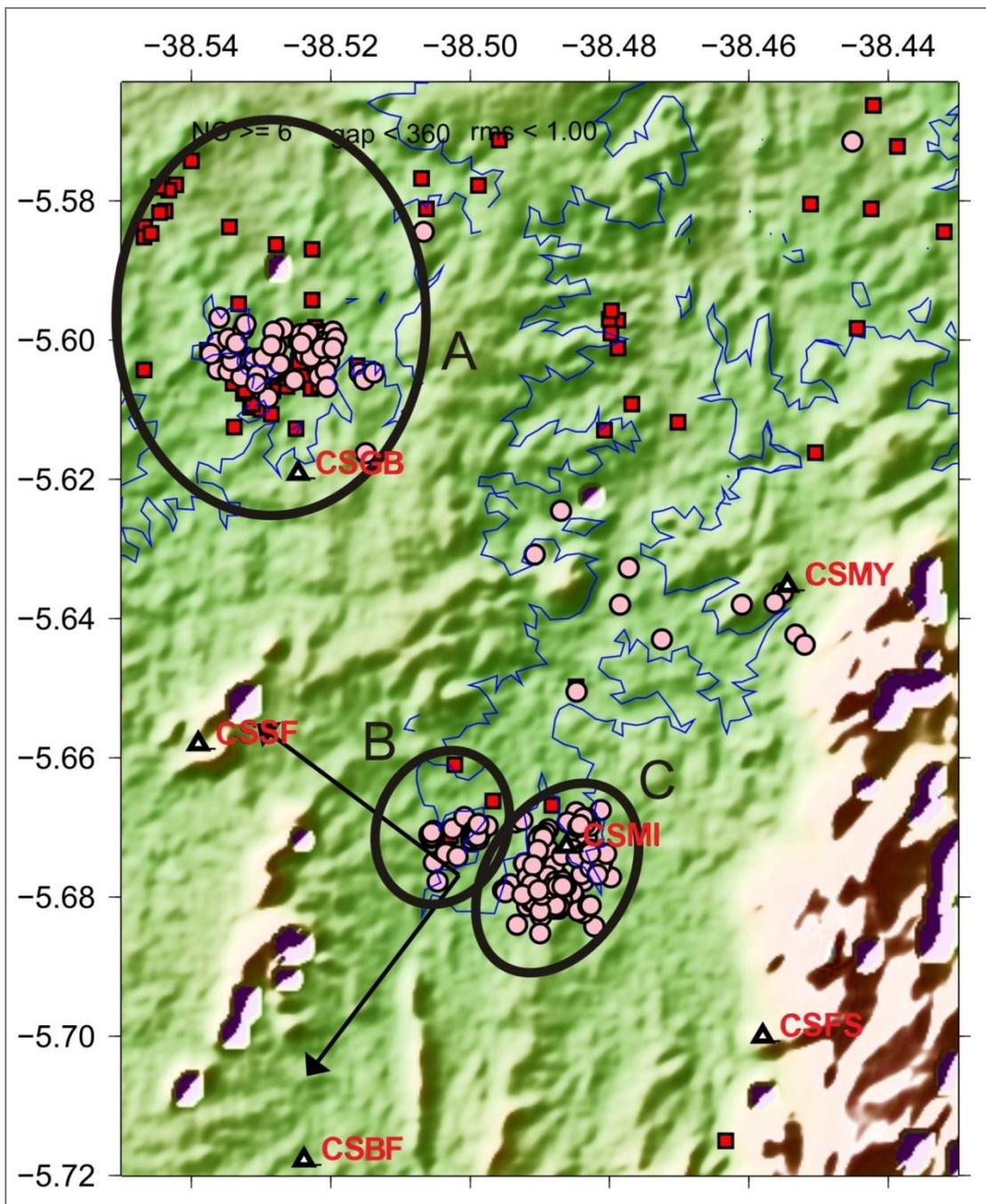
Figura 4.8: Localização do açude do Castanhão. Em vermelho temos a área da localização da rede (Pe. Cícero).



Fonte: Modificado de www.dnocs.gov.br.

O monitoramento da sismicidade dos dados aqui apresentado foi realizado no período entre 19 de novembro de 2009 até 31 de dezembro de 2010. Uma rede de seis estações digitais de três componentes foi distribuída na região. Os equipamentos utilizados pertencem ao Pool de Equipamentos Geofísicos do Brasil (PEGBr), com sede no Observatório Nacional.

Figura 4.9: Mapa da localização da rede e dos epicentros com topografia. O contorno da barragem está exibido em azul. Os círculos cor-de-rosa representam os sismos mais rasos (até 1,4 km) enquanto que os quadrados vermelhos apresentam os sismos mais profundos (acima de 1,4 km). Os principais aglomerados de atividades são marcados com as elipses A, B e C.



Durante o período de monitoramento foram registrados 526 sismos. Para efeito de análise só foram considerados os eventos registrados em pelo menos três estações. Estes eventos mostraram-se concentrados em três aglomerados, A, B, C e outros dispersos pela região. O aglomerado C apresenta poucos sismos em

novembro de 2009 vindos a ter uma maior atividade no mês posterior com eventos de profundidades de até 1,0 km.

Como visto neste capítulo, a Mina Bonito está inserida praticamente na bacia hidráulica da Barragem Armando Ribeiro e muito próximo do maior reservatório do semiárido setentrional do nordeste, a Barragem Castanhão no estado do Ceará, ambas com histórico comprovados e monitorados de ocorrência de sismos induzidos e como consequência aumentando a possibilidade de desenvolvimento do fenômeno da liquefação nos rejeitos e estéril da atividade de mineração, num raio de 300 a 500 km, em ambas a barragens.

4.3.1 Fenômenos e casos de rupturas associados à liquefação

A liquefação pode ser basicamente entendida como sendo uma ação de levar qualquer substância de seu estado natural ao estado fluido e, no caso dos solos, do estado sólido para o estado liquefeito. Para tal, impõe-se um dado acréscimo da poropressão em concomitância com a redução das tensões efetivas. Esta transformação decorre da brusca aplicação de uma determinada carga, que pode ter origem estática ou dinâmica.

A liquefação dinâmica, também chamada de liquefação espontânea, está relacionada a carregamentos dinâmicos, particularmente eventos sísmicos. Dois aspectos são mais significativos para a análise da liquefação por indução sísmica: a condição de tensão ativadora e a consequência do fenômeno (SEED, 1987).

A liquefação, durante um carregamento dinâmico, pode ser induzida em qualquer zona de um depósito de material granular, sendo a ativação do fenômeno dependente da magnitude das deformações causadas pelo carregamento e das condições de campo, particularmente ao estado de compacidade dos solos (SEED; LEE, 1966). Neste sentido, o evento pode propagar-se às camadas superiores, em função do desencadeamento inicial nas camadas inferiores, as quais estão submetidas a um carregamento de base. Nesse caso, o excesso de poropressão das camadas subjacentes apresentará uma tendência de dissipação no sentido ascendente, fazendo com que o processo seja também concluído nas camadas mais superficiais.

A liquefação estática tem sido estudada com muito menor ênfase que a liquefação associada a eventos dinâmicos, constatando-se um número ainda limitado de pesquisas e publicações relacionadas ao assunto na literatura técnica. Davies *et al.*

(2002) associam a ausência de publicações ao pouco conhecimento do fenômeno ou mesmo a um conhecimento isento de explicações associadas a carregamentos não-sísmicos. A liquefação estática pode estar associada a eventos tais como: Elevação do nível d'água em depósitos de materiais granulares; Carregamentos rápidos; Movimentos de massa na área de influência dos depósitos de materiais granulares; Excessos de precipitação pluviométrica; e Explosões para desmanche do minério.

4.3.2 Variáveis influenciadoras do fenômeno da liquefação

A diversidade e as consideráveis diferenças comportamentais apresentadas nos diversos solos naturais e materiais artificiais culminam em variáveis que tendem a influenciar o fenômeno a liquefação, podendo estar ligadas desde as características associadas à natureza do material, até tipos de solicitações externas.

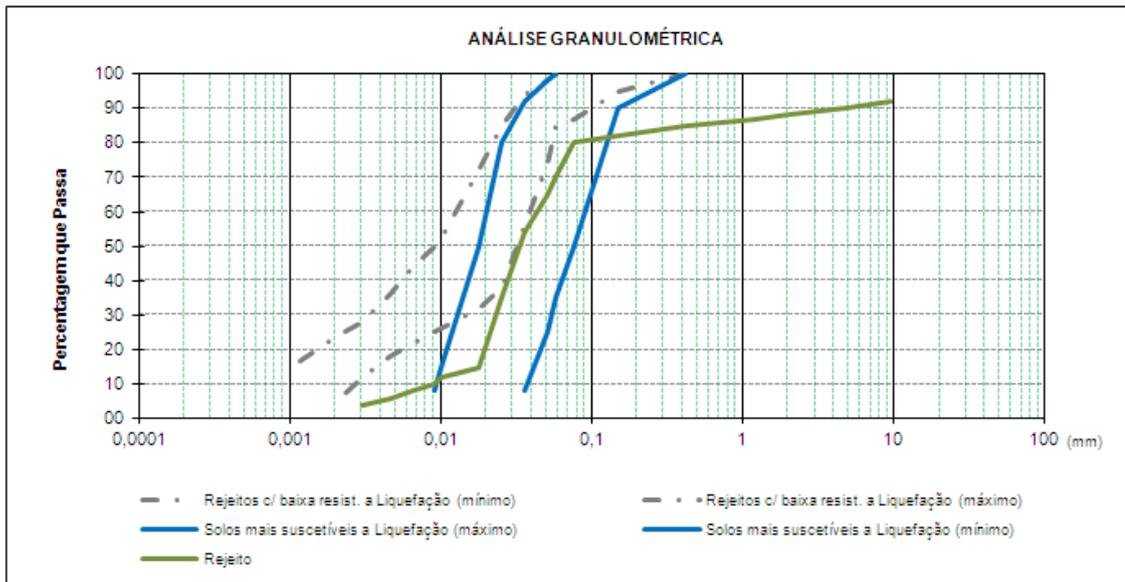
Assim, são destacados fatores associados à natureza e estado do material como a distribuição granulométrica e a fatores externos como natureza e velocidade do carregamento.

A distribuição granulométrica é um dos fatores de maior relevância quando se discute susceptibilidade à liquefação. Os materiais granulares finos e uniformes são mais propensos a liquefazer-se quando comparados aos materiais de granulometria mais grosseira. Terzaghi *et al.* (1996), definem faixas granulométricas em que um determinado material granular apresenta maior ou menor susceptibilidade à liquefação (Figura 4.10).

No quadro da figura acima citado, apresentamos as informações da granulometria média fornecida pela Mineração MHAG, plotadas na curva de limites granulométricos de suscetibilidade à liquefação estudado por Terzaghi *et al.* (1996), onde verificamos que o estéril produzido pela Mina Bonito, se enquadra perfeitamente como susceptível a ocorrência de liquefação, quando usado em disposição de rejeitos de minério de ferro.

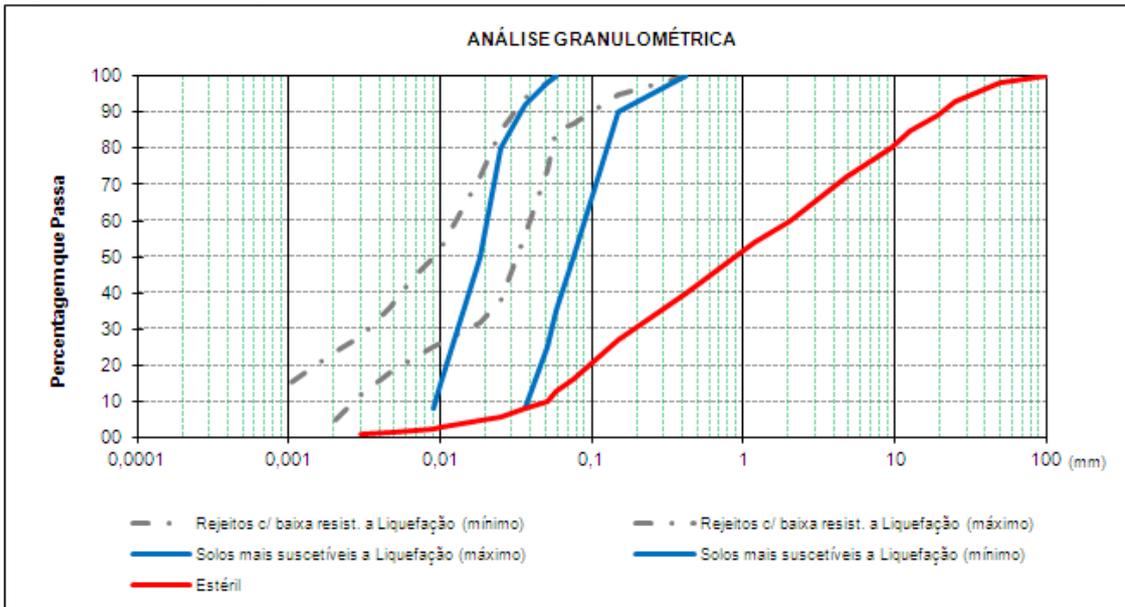
Com relação à curva granulométrica do estéril (ver Figura 4.11), podemos afirmar que o material é menos propenso de suscetibilidade à Liquefação. Entretanto devido sua granulometria indicar um solo granular, correspondendo a um enrocamento, este tipo de material pode ser utilizado nas barragens de rejeitos, sendo projetado em estrutura convencional, principalmente em barragens de seção mista, como material (enrocamento) de proteção ao núcleo argiloso.

Figura 4.10: Limites granulométricos de suscetibilidade à liquefação.



Fonte: Modificado de Terzaghi *et al.* (1996), para as condições da Mineração MHAG, Rejeito.

Figura 4.11: Limites granulométricos de suscetibilidade à liquefação.



Fonte: Modificado de Terzaghi *et al.* (1996), para as condições da Mineração MHAG, Estéril.

Pelo acima exposto, podemos sugerir generalizando, que não devemos utilizar projetos de disposição de rejeitos de minérios na região do semiárido nordestino, em região submetida a Sismos Induzidos pelo Homem/Reservatório (SIH/SIR) e como consequência a possível liquefação das estruturas construídas com rejeitos. Não devem ser utilizados os seguintes processos:

- Barragem de Aterros Hidráulicos;
- Barragem construída pelo alteamento do Método de Montante;

- Barragem construída pelo alteamento Método de Linha de Cento;
- Pilhas de Estoque sem proteção (confinamento);
- Pilhas de Estoque com proteção, e alteamentos para Montante e de Linha de Centro.

Nossa sugestão para o semiárido nordestino em termos concepção de projeto de disposição de rejeitos de minérios, em região onde poderão ocorrer sismos induzidos, é uma as seguintes alternativas abaixo e ou com a mesclagem de vários métodos:

- Disposição em Cava de Fundação da Própria extração do minério (PIT);
- Disposição em Barragens Convencionais;
- Disposição em Barragens Convencionais, mas com Alteamento pelo Método de Jusante.

Os métodos acima citados, em função da disponibilidade de terrenos da mina de sua propriedade, poderão ser adotados uma única Barragem de Rejeito, ou a combinação de dois métodos, sempre com fulcro no menor custo do investimento e planejamento do futuro descomissionamento.

Deverão ser escolhidos locais o mais próximo possível da lavra, nano bacias para minimizar o custo com o vertedouro, local geologicamente apropriado para implantação da fundação, relevo favorável para a drenagem superficial, prever a implantação de instrumentação para melhorar a segurança da estrutura, inclusive prever providências de práxis para as comunidades de jusante e suas propriedades, tendo sempre como fulcro o menor custo durante a vida útil do empreendimento.

4.4 SUGESTÕES PARA ESTUDO DE CASO

Reportando ao Estudo de Caso, especificamente a Mina Bonito situada no município de Jucurutu, tendo como particularidade da lavra em termos de segurança, está praticamente dentro da Área de Preservação Permanente e da bacia hidráulica da Barragem Armando Ribeiro, potencializado negativamente pelas falhas geológicas de São Rafael e outras da região, muito próximo de grandes barragens do nordeste com altura de água superior a 100m, existindo na região atividade mineira, exploração do aquífero para exploração de água para abastecimento e irrigação, atividade petrolífera e como consequência destes óbices a grande probabilidade de ocorrer sismos induzidos, induzindo a liquefação dos rejeitos.

Face ao exposto, sugerimos as seguintes alternativas para disposição dos rejeitos de minério de ferro da mina em tela, partindo da premissa da pequena área que dispomos, cerca de 100 ha, para tal fim:

- Uma única Barragem de rejeito, que poderia ser do tipo convencional com alteamentos para jusante, neste caso a administração teria de adquirir um terreno o mais próximo possível da mina, e o mais distante do manancial da Barragem Armando Ribeiro, evidentemente atendendo o estado da arte já descrito acima, incluindo na jusante da barragem uma possível estrutura para tratamento da água usada no processo extrativo, melhorando o descarte e atendendo as exigências do processo ambiental.

- Como solução a ser implantada na disponibilidade de área atual que é de 100ha na Mina Bonito projetaria duas Barragens Convencionais ou duas barragens convencionais, construídas com alteamento pelo Método de Jusante, com capacidade de armazenamento do estéril e rejeitos relativos a dois anos de operação, construção da primeira de imediato, a segunda após dois anos de operação. A partir do quarto ano de operação, seria utilizada a disposição dos rejeitos pelo método Cava de Fundação (PIT), até o final da vida útil da mina e descomissionamento. Se necessário o perímetro da futura Cava de Fundação não for suficiente para receber o estéril e rejeitos produzidos durante a operação, o perímetro da cava de Fundação poderá ser alteado pelo Método de Jusante com quantas fatias se fizerem necessário. Evidentemente o estado da arte descrita nesta dissertação deve ser obedecido sobre qualquer circunstância, principalmente na escolha da estrutura do vertedouro e da drenagem interna da Cava de Fundação, drenagem superficial e o canal de restituição para o principal sistema de fluvial da região da lavra, o rio Piranhas/Açu.

4.5 SUGESTÕES PARA UTILIZAÇÃO DO ESTÉRIL E REJEITOS

Com relação aos volumes de rejeitos gerados no momento, face o percentual residual de ferro, estes devem ser estocados nas barragens de rejeitos projetadas, e esperar que o avanço da tecnologia se desenvolva, até surgir um novo processo de extração de minério de ferro para um aproveitamento de maneira segura, rentável e agregando valor ao produto exportado.

Para o estéril além da consideração acima citada, faremos abaixo as considerações e sugestões, partindo da realidade dogmática do semiárido nordestino, para produzir 1,00 m³ de solo utilizável em obras de Engenharia Civil, são necessários os serviços de desmatamento, destocamento, limpeza, expurgo e custo com o passível ambiental, relativo a uma área de 4,00m². Usando este Estéril, estamos agindo corretamente sobre o ponto de vista ambiental e sustentável. Logo concluímos que sem sombra de dúvidas, o Estéril tem valor comercial para ser negociado pela administração da mina como contrapartida em investimentos da esfera governamental.

– A partir de 2013 após a conclusão de estudos para implantação de nova planta de exploração, foi estudada uma nova logística rodoviária para exportação do ferro pelo Porto do Mangue/RN, com distância de transporte de 155,00 km. O Estéril poderia ser utilizado na construção da rodovia e do pátio de estocagem (Pêra), que será construída até Porto do Mangue, seria a contrapartida da administração da mina no futuro investimento governamental;

– O acesso à mina partindo da BR-226 são 17,00 km com rodovia em revestimento primário, a estrada em tela poderia ser melhorado seu desenvolvimento geométrico, diminuindo as rampas e aproveitando o relevo para construção de aterros barragens e implantar uma pavimentação a paralelepípedo usando no colchão de areia o estéril e futuramente o revestimento asfáltico, poderá ser projetado do tipo Areia Asfalto em que o solo fino utilizado poderá ser o estéril devido sua granulometria propícia;

– Está em andamento, pelo Governo do Estado estudos e projetos para regionalização dos Resíduos Sólidos do RN, e Jucurutu é um dos vinte e cinco municípios da região que fará parte do “Consorcio do Seridó”, cujo aterro sanitário será implantado no município de Caicó, sendo necessários cerca 85.000,00 m³ de solo para cobrir os resíduos sólidos durante a vida útil estimada em 20 anos. O Estéril tem condições geotécnicas para atender a especificação do solo a ser usado como cobertura do resíduo, participando como insumo aos impostos de praxis incidindo sobre a mina;

– Com a implantação do “Consórcio do Seridó”, municípios como Jucurutu, e os mais próximos como Florânia, São Vicente, Triunfo Potiguar e Tenente Laurentino Cruz, são portadores de “Lixões” que com o advento do Aterro Sanitário

em Caicó, será necessário descomissionar os passivos ambientais. O Estéril também atende as especificações como solo para ser usado como cobertura;

- Outro uso do Estéril seria como material a ser utilizado como colchão de areia na pavimentação de ruas a ser executada, principalmente no município de Jucurutu, como insumos para abater parcialmente os tributos municipais;

- Outro uso seria o projeto PAVIECO, este visa à utilização dos rejeitos de minério de ferro para confecção de pavimento ecologicamente correto, retirando o rejeito de minério das barragens de disposição, tornando-o ao mesmo tempo em um produto comercializável. Aqui está incluída a confecção dos paralelepípedos do rejeito com adição de cimento, vazados ou não. Os blocos vazados seriam utilizados em áreas de infiltração, alimentando o lençol freático;

- A indústria de cerâmica vermelha no RN tem sua maior concentração na região do Vale do Açu, podendo ainda ser encontrada nas mais diversas regiões do Estado, desde a região do agreste até a região do Seridó, portanto com intensa participação na atividade econômica do Estado. O rejeito do minério de ferro como matéria-prima na elaboração de produtos cerâmicos vermelhos tem como objetivo diminuir os impactos ambientais, transformando esses resíduos em elementos positivos para o bem comum. Evidente seu consumo é mínimo mais é outra oportunidade de uso comercial pela administração da mina;

- Outra opção de uso do Estéril e Rejeitos seria uma mistura com baixa percentagem de cimento, para confecção de tijolos ou blocos estruturais a ser utilizado na construção civil. Entretanto esta sugestão para quantidade de estéril e rejeitos produzidos pela mina é mínima, mais é uma utilização de valor comercial.

Podemos avaliar o uso de resíduos de mineração de ferro como filtro em obras de terra, principalmente para barragens, em substituição a areia natural encontrada nos rios e dunas. Neste contexto, os resultados obtidos a partir do estudo desses resíduos considerando suas características físicas, químicas e mineralógicas avaliando principalmente a composição granulométrica, compacidade, durabilidade, permeabilidade em condições específicas de confinamento e alterações químicas. Adicionalmente, serão realizados ensaios de permeabilidade saturada simulando diferentes condições de confinamento e compacidade. A proposta principal desta pesquisa foi justificar as possíveis alterações no comportamento destes resíduos a partir da análise da sua compatibilidade física, química e mineralógica neste tipo de utilização. Assim, os resultados obtidos

permitiram avaliar as potencialidades do uso do resíduo de minério de ferro como alternativa ambientalmente viável em aplicações como filtros de barragens.

Finalizando, nesta dissertação procedeu-se a uma ampla revisão bibliográfica acerca do estado da arte atual, ficando claro que no semiárido nordestino em regiões que há atividade sísmica e como causa a liquefação dos estéreis, potencializado por ocorrência de falhas geológicas, as sugestões indicadas nesta dissertação para o semiárido e especificamente para a Mina Bonito são bastante pertinentes.

Entretanto, existem ainda vários parâmetros que devem ser estudados visando segurança da barragem de rejeitos, e estes parâmetros ainda não foram padronizados pela literatura, mas poderão ser temas futuros de novas dissertações. Parâmetros quantitativos, como altura, comprimento da crista, conseqüências sociais, econômicas e ambientais a jusante, questões estruturais das barragens e custos para reabilitação são aspectos que devem ser levados em consideração, mas ainda carecem de estudos, que poderão ser temas de futuras dissertações. A dificuldade de padronização destes aspectos se baseia nas diferenças de gestão de cada país ou cada região, e pelo fato de cada barragem de rejeitos apresentar características próprias (solo, método de construção, propriedades dos rejeitos etc.).

Definir qual o risco aceitável para cada barragem de rejeito é um aspecto complexo e que envolve uma série de agentes sociais, lembrando que quanto maior o nível de segurança desejado, maior também serão os custos envolvidos no processo de aplicação e controle destes riscos.

Outra questão importante, da qual depende a segurança, é a de garantir que a legislação seja efetivamente aplicada. Em alguns casos, isso irá ocorrer quando medidas punitivas passarem a ser adotadas.

Outro aspecto salutar é realizar o monitoramento contínuo das estruturas durante a construção, enchimento e operação. Frequentemente, os procedimentos para monitoramento devem ser aprovados formalmente e as autoridades e órgãos fiscalizadores são informados sobre os resultados deste monitoramento.

REFERÊNCIAS

ABNT. **Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm** – Determinação da massa específica. NBR 6508. São Paulo: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984a. 8 p.

_____. **Solo – Análise granulométrica**. NBR 7191. São Paulo: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984b. 13 p.

ABRÃO, P.C. Sobre a deposição de rejeitos de mineração no Brasil. In: **I Simpósio sobre barragens de rejeito e disposição de resíduos industriais e de mineração – REGEO'87**, ABMS/ABGE/CBGB/CE, Rio de Janeiro, RJ, I: 1-10, 1987.

ALVES, R.C.A. **Disposição compartilhada de rejeito e estéril gerados no processo de extração de minério de ferro**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, DF. 183 p., 2009.

ANDERSON, D.L.; BYRNE, P.M.; DEVALL, R.H.; NAESGAARD, E.; WIJEWICKREME, D. *et al.* **Task force report on geotechnical design guidelines for buildings on liquefiable sites in greater Vancouver in accordance with NBC2005**. University of British Columbia Publication, 2007.

ARAGÃO, G.S. **Classificação de pilhas de estéril na mineração de ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, 2008, 133p.

ASSIS A.; ESPÓSITO, T.; Construção de barragens de rejeito sob uma visão geotécnica. In: **III Simpósio Sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos – REGEO**, pp. 259-273, 1995.

AUBERTIN, M.; MBONIMPA, M.; BUSSIÈRE, B.; CHAPUS, R.P. A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. **Canadian Geotechnical Journal**, 40(6), 1104-1102, 2003.

BEEN, K.; CROOKS, J.H.A.; CONLIN, B.H.; HORSFIELD, D. Liquefaction of Hydraulically Placed Sand Fill. **Specialty Conference on Hydraulic Fill Structures**, Hydraulic Fill Structures, ASCE, Fort Collins, USA, pp. 573-590, 1998.

BERROCAL, J.; ASSUMPCÃO, M.; ANTEZANA, R.; DIAS NETO, C.M.; ORTEGA, R.; FRANÇA, H.; VELOSO, J.A.V. **Sismicidade do Brasil**. São Paulo: IAG/USP/CNEN, 1984, 320 p.

BOHNET, E.L. Optimum dump planning in rugged terrain. In: McCARTER, M.K. Design of non-impounding mine waste dumps, **AIME**, New York, 1985, Chapter 3, p.23-27.

BRASIL. **Lei nº 12.334/2010**. Dispõe sobre responsabilidades e atribuições a respeito do cuidado com a segurança das barragens brasileiras. 2010.

_____. **Lei nº 6.938/81**. Dispõe sobre a Política Nacional de Meio Ambiente. 1981.

_____. **Lei nº 9.605/98**. Dispõe sobre os crimes ambientais. 1998.

_____. Ministério da Integração Nacional. Secretaria de Infraestrutura Hídrica. **Manual de segurança e inspeção de barragens**. Brasília, DF, 2002.

_____. Ministério de Integração Social. Secretaria de Infraestrutura Hídrica. **Manual de segurança e inspeção de barragens**. Brasília, julho/2002.

_____. Ministério do Planejamento. Plano Nacional de Defesa Civil (PNDC). 2000.

_____. **NBR 13028 – Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)**. Mineração – elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e preservação de água, São Paulo, SP. 6 p., 2006.

BRAY, J.D.; SANCIO, R.B.; RIEMER, M.; DURGUNOGLU, H.T. Liquefaction susceptibility of fine-grained soils. **Proceedings 11th ICSD and 3th ICEGE**, January 7-9, 2004, UC Berkeley, Ca., USA.

CÁRDENAS, J.L.G. **Estudo de modelos constitutivos para previsão da liquefação em solos sob carregamento monotônico**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro/RJ, 2004.

CARRARO, J.A.H.; P. BANDINI; R. SALGADO. Liquefaction resistance of clean and non-plastic silty sands based on cone penetration resistance. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, 129(11), 965-976, 2003.

CASTRO, G. **Liquefaction of sands**. PhD. Thesis, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, 1969.

CBDB. **Barragens de rejeito no Brasil**. Comitê Brasileiro de Barragens. 308 p., 2012.

_____. **Guia básico de segurança de barragens**. Comitê Brasileiro de Barragens – Núcleo Regional de São Paulo. São Paulo, 1999.

CHAMMAS, R. **Barragens de contenção de rejeitos**. Curso de Especialização em Engenharia de Barragens (CEEB), UFOP, Ouro Preto, MG, 29 p., 1989.

DAVIES, M.; McROBERTS, E.; MARTIN, T. Static liquefaction of tailings: fundamentals and case histories. In: AMEC EARTH & ENVIRONMENTAL. 2002, Vancouver and Edmonton. **Proceedings...** Edmonton, Canadá, 2002.

DUNNICLIFF, J. **Geotechnical instrumentation for monitoring field performance**. New York: Willey, 1988.

ESPÓSITO, T.J. **Controle geotécnico da construção da barragem de rejeito: análise da estabilidade de taludes e estudos de percolação.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 159 p., 1995.

_____. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeitos construídas por aterros hidráulicos.** Universidade de Brasília. Brasília-DF, 2000.

_____. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico.** Brasília: UnB, 2000. 363 p. Tese (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2000.

FARIA, C.E.G. **A mineração e o meio ambiente no Brasil.** [S.l.]: CGEE, 2002. 41 p. Disponível em: <http://www.cgee.org.br/arquivos/estudo011_02.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2014.

FERRAZ, F. **Disposição de rejeitos de mineração: aperfeiçoamento técnico dos serviços de engenharia em atividades de mineração.** Ouro Preto. Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, UFOP, 1993.

FERREIRA, J.M. **Sismicidade e esforços no Nordeste do Brasil.** Tese (Doutorado). Instituto de Astrofísica e Geologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997, 126p.

FERREIRA, J.M.; OLIVEIRA, R.T.; TAKEYA, M.; ASSUMPÇÃO, M. Superposition of local and regional stress in NE Brazil. In: SBGF, Cong. Inter. Soc. Bras. Geof., 2, Rio de Janeiro, **Res. Expandidos**, 1925-1028.

FERREIRA, J.M.; TAKEYA, M.K.; COSTA, J.M.; MOREIRA, J.A.M. *et al.* A continuing intraplate earthquake sequence near João Câmara – Northeastern Brazil – preliminary results. **Geophys. Res. Lett**, 14: 1402-1405.

GOMES, R.C. **Utilização de solos finos naturais, resíduos de mineração e materiais sintéticos em projetos de infraestrutura de rodovias e ferrovias.** Ouro Preto: Convênio UFOP/CVRD/DER-MG. Projeto FAPEMIG. 2004.

GOMES, R.C.; ARAÚJO, L.G.; FILHO, W.L.O. *et al.* Concepção e projeto básico da disposição em pilhas de rejeitos de minério de ferro em cava exaurida de mineração. In: **4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental**, pp. 161-168, São José dos Campos, 1999.

GRISHIN, M.M. Hydraulic structures. **Mir Publishers** (Translated from the Russian by Prem Kumar Dang), Moscow, URSS, v. 1, 468p. 1982.

GUIMARÃES, N.C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas.** Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2011, 129 p.

ISHIHARA, K. Liquefaction and flow failure during earthquakes. **Géotechnique**, v. 43, n. 3, p. 351-415, 1993.

ISHIHARA, K.; TRONCOSO, J.; KAWASE, Y.; TAKAHSHIMI, Y. Cyclic strength characteristics of tailings materials. **Soils and Foundations**, Japanese Society of Soils Mechanics and Foundations Engineering, v. 20, n. 4, p 128-142, 1980.

KANJI, M.A.; FIULGUEIRA, P.C.S. Qualificação tentativa do uso de instrumentação em barragens. In: **Simpósio sobre instrumentação geotécnica de campo**, 1990, Rio de Janeiro.

KLOHN, E.J. **The development of current tailing dam design and construction methods**. Design and Construction of Tailing Dams, D. Wilson (ed.), Colorado School of Mines, Golden, USA, 1982.

KRAMER, S.L. **Liquefaction of sand due to non-seismic liquefaction**. Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, University of California, Berkeley, January, 1985.

KRAUSE, A.J. Regulatory and technical tailings design considerations in Chile. In: **Proceedings of the 4th International Conference on Tailings and Mine Waste '97**, Fort Collins, Colorado, USA, p. 51-55, 1997.

KÜPPER, A.M.A.G. **Design of hydraulic fill**. PhD Thesis, Dept. of Civil Engineering. University of Alberta. Edmonton, Canada, 525p., 1991.

KUYUCAK, N. Acid mine drainage. **Mining Environmental Management**, p. 12-15, Canadá, 2001.

MARANHÃO, R.J.L. **Introdução à Pesquisa Mineral**. Fortaleza: BNB. ETENE, 1997.

MELLO, V.F.B. Diferenças sérias entre barragens de acumulação de água e de rejeitos. In: **Simpósio sobre barragens de rejeitos e disposição de resíduos industriais e de mineração**, vol. 2, pp. 1- 43, 1998.

_____. Diferenças sérias entre barragens de acumulação de água e de rejeitos. In: **Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração**, dez. 1987, Rio de Janeiro. Barragens de rejeitos e disposição de resíduos industriais e de mineração: **Anais**. Rio de Janeiro: Abms/abge/cbgb/dtg-Ce, 1987. p. 1-43, v.2.

MORETTI, M.R.; CRUZ, P.T. Aterros hidráulicos e sua aplicação na construção de barragens. In: CRUZ, P.T. **100 Barragens Brasileiras**: casos históricos, materiais de construção e projeto. São Paulo: Oficina de Textos, 1996. p. 556-591.

MORGENSTERN, N. Geotechnics and mine waste management update. In: **Seminar of Safe Tailings Dams Constructions**. 2001, Gallivare, Sweden. Proceedings... Gallivare, 2001.

NASCIMENTO, A.F. **Estudo da sismicidade induzida pelo reservatório da Barragem do Assu (RN)**. Dissertação (Mestrado). PPGG/UFRN, Natal/RN, 1997. 89p.

NIEBLE, C.M. **Deposição de rejeitos**: curso de geotécnica aplicada a minas a céu aberto. Itabira, MG: Abib Engenharia S.A., 1986. 28p. il. Apostila.

OSTENAA, D. **Evaluation of seismic hazards Açú dam and reserve in Rio Grande do Norte, Brazil**. Denver:U.S. Bureau of Reclamation, 1988. 24p.

PACKER, D.R. *et al.* Reservoir induced seismicity. Association with active faulting at selected reservoir. In: Simpósio sobre Sismicidade Natural e Induzida. São Paulo, 1979, **Anais**, São Paulo: ABGE, 1979, p. 107-149.

PALMIER, L.R. **Os impactos ecológicos das grandes barragens hidrelétricas**. Projeto de Fim de Caso. Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1987, 153 p.

PASSOS, N.C.S.T. **Barragem de rejeito**: avaliação dos parâmetros geotécnicos de rejeitos de minério de ferro utilizando ensaios de campo – um estudo de caso. Projeto de Graduação, UFPR, Curitiba, PR, Brasil, 2009.

PRESOTTI, E.S. **Influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto, MG, 153 p., 2002.

RIBEIRO, L.F.M. **Simulação física do processo de formação dos aterros hidráulicos aplicados à barragens de rejeitos**. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 232 p., 2000.

RITCEY, G.M. **Tailings management, problems and solutions in the mining industry**. New York: 1989, p.2-76.

SANTOS, A.G. Influência do teor de ferro na condutividade hidráulica saturada de um rejeito de minério de ferro. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, julho de 2004.

SCHUMPETER, J. **Teorias econômicas de Marx a Keynes**. Rio de Janeiro: Zahar, 1970.

SIMPSON, D.W. Triggered earthquakes. **Ann. Rev. Earth Planet, Sci**, 1, 21-42pp.

SOARES, L. **Barragem de rejeitos**. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, 2010. Apostila de Aula.

TAVEIRA, A.L.S. **Análise qualitativa da distribuição de custos ambientais**: estudo de caso da Samarco – Mineração S.A. 1997. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 1997, 162p.

TAKEYA, M.K.; FERREIRA, J.M.; PEARCE, R.G. *et al.* The 1986-1987 intraplate earthquake sequence near João Câmara, northeast Brazil – evolution of seismicity. **Tectonophysics**, 167: 117-131.

TERZAGHI, K.; PECK, R.B.; MESRI, G. Soil Mechanics in Engineering Practice, Third Edition. **John Wiley & Sons**, Inc., New York, 1996, 549 p.

THEVANAYAGAM, S.; LIANG, J. ; SHENTHAN, T. A contact index for liquefaction potential analysis of silty/gravelly soils. **Proc. 14th ASCE EMD Spec. Conf.**, Tassoulas, ed., Austin, Texas, 2000.

TORRES, H.H.F. **Metodologia para estudos neotectônicos regionais: o caso João Câmara**. Recife: CPRM, 50p. il. Série Publicações Especiais, 3.

VICK, S.G. Planning. Design and analysis of tailing dams. **John Wiley & Sons**. New York. 1983.

WELSH, J.D. Geotechnical site investigation. In: McCARTER, M.K. Design of non-impounding mine waste dumps, **AIME**, New York, 1985, Chapter 4, p. 31-34.

YAMAMURO, J.A.; LADE, P.V. Static liquefaction of very loose sands. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 34, p. 905-917, 1997.